



Pedro Miguel Marinheiro Silva

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Cálculo de galgamento em estruturas marginais. O caso de Cova Gala.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Doutora Ana Cristina Santos Mendonça, Bolseira
de Pós-Doutoramento do LNEC

Co-orientadora: Professora Doutora Maria da Graça Reis e Silva
de Oliveira Neves, FCT-UNL/LNEC

Júri:

Presidente: Prof. Dr. Rodrigo M. Gonçalves
Arguente: Prof. Dr. Luís Miguel Chagas Costa Gil
Vogal: Prof^a. Dr^a. Maria da Graça Neves

Novembro, 2019



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

"Copyright" Pedro Miguel Marinheiro Silva, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

O fim desta dissertação traz consigo o fim de uma etapa da minha vida cheia de dificuldades, alegrias e tristezas. Desta forma, gostaria de agradecer, mesmo que brevemente, às pessoas que me acompanharam por este caminho.

Um agradecimento especial à Professora Maria da Graça Neves, pelo seu apoio e dedicação totais, e pela paciência na transmissão dos ensinamentos fundamentais que necessitei para esta dissertação e pela simpatia com que sempre me recebeu quando precisava de ajuda.

À Doutora Ana Mendonça, um enorme agradecimento por todo o apoio, dedicação e prestada, imprescindíveis para a realização desta dissertação, e pelo tempo dedicado na resolução de problemas complicados que surgiram durante estes 8 meses.

Ao departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) pela oportunidade de realização do estágio, e pelos meios e apoio disponibilizados.

A todos os meus colegas de curso com quem tive oportunidade de trabalhar, que também se tornaram amigos para a vida, e que “sofreram” comigo as dificuldades do curso, obrigado por todos os grandes momentos vividos.

E por fim, quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais, irmão e avós, a quem dedico esta vitória. Foram muitos os momentos de desespero durante todo este percurso, mas o vosso apoio fez-me lutar com todas as minhas forças para terminar esta etapa e encher-vos de orgulho.

Resumo

O objeto de estudo da presente dissertação é o galgamento numa defesa longitudinal aderente situada na praia da Cova-Gala (Figueira da Foz), caso crítico no litoral português, por ser uma zona que se encontra significativamente erodida, sujeita a condições de agitação incidentes na estrutura, adversas em situação de temporal.

Para o estudo do galgamento nesta estrutura, foram considerados 86200 dados de *hindcast* da agitação marítima local em frente à estrutura, correspondentes a um total de 58 anos de dados. No cálculo do caudal médio galgado, aplicou-se a fórmula semi-empírica de Mase *et al.* (2013), a única aplicável a estruturas cuja cota da fundação está acima do nível médio do mar. Analisou-se o caudal galgado no período referido, tal como uma análise de sensibilidade dos resultados aos parâmetros de redução do galgamento devido ao atrito, γ_f , e do ângulo de ataque das ondas, γ_β .

No que se refere à aplicação de um coeficiente de redução devido ao atrito, verificou-se que um valor superior resulta num maior caudal galgado, ocorrendo um aumento de 41 % entre valores de 0.8 e 0.9. Relativamente ao coeficiente de redução devido ao ângulo de ataque da onda, observou-se que este coeficiente provoca sempre uma diminuição do galgamento.

Na análise comparativa do galgamento segundo a fórmula de Mase *et al.* e a versão alterada de Masatoshi *et al.*, observou-se que ambas diferem apenas para caudais reduzidos.

Por fim, da comparação dos caudais galgados obtidos segundo Mase *et al.* e EuroTop conclui-se que os valores por EuroTop são muito superiores, com um aumento do caudal máximo que pode chegar a 60%.

A fim de verificar da capacidade do modelo numérico IH-2VOF em calcular o galgamento na defesa longitudinal aderente em estudo, foram selecionados três casos de agitação para aplicação do modelo, que correspondem a diferentes gamas de caudais galgados. Devido ao elevado tempo de processamento da simulação do domínio total, este foi dividido em dois, e foi analisado o erro inerente à forma como o modelo passa informação entre domínios. Verificou-se que é a velocidade horizontal na entrada do segundo domínio o parâmetro que é pior reproduzido, o que pode levar a grandes diferenças de resultados do galgamento. Verificou-se ainda que o tempo de cálculo do segundo domínio, que incluía a defesa aderente, era demasiado grande, o que torna esta ferramenta desadequada para apoio ao projeto deste tipo de obras.

Palavras chave: Galgamento, Defesa longitudinal aderente, Mase *et al.* (2013), coeficientes de redução do galgamento, Modelação numérica, Acoplamento, IH-2VOF.

Abstract

The following dissertation's study object is the overtopping of a seawall located in Cova-Gala beach (Figueira da Foz), a serious case of the Portuguese seashore, due to this zone being significantly eroded and subject to the adverse incident wave climate, on the structure, under storm settings.

In order to study this structure's overtopping, 86200 hindcast wave parameters of the local wave climate in front of the structure were considered, corresponding to a total of 58 years of data. For the calculation of the average wave overtopping discharged, the semi-empirical formula by Mase *et al.* (2013) was applied, being the only one applicable to structures which have their base's elevation above the average sea level. The average wave overtopping discharged was analyzed in the referred period, and a sensibility analysis of the results was performed for the roughness influence factor, γ_f , and the oblique wave attack influence factor, γ_β . Regarding the application of a roughness influence factor, it was found that a higher value resulted in a larger overtopping discharge, showing an increase of 41 % between values of 0.8 and 0.9. Regarding the oblique wave attack influence factor, it was found that this coefficient always causes a reduction in the overtopping discharge. In the comparative analysis of overtopping formula of Mase *et al.* and the modified version of Masatoshi *et al.*, it was observed that both differ only for reduced flow rates.

Lastly, from the comparison between the overtopping discharges obtained from Mase *et al.* and EuroTop, it was concluded that the EuroTop are significantly superior, with an increase in max overtopping discharge reaching 60%.

In order to verify the IH2VOF numerical model's capacity for calculating the seawall in study, three wave conditions were selected for model application, which correspond to distinct overtopping discharge ranges. Due to the long processing time of the total domain's simulation, this domain was divided in two and the inherent error, regarding the transfer of information between domains, was analyzed. It was found that the horizontal velocity in the entrance of the second domain is the worst reproduced parameter, which can lead to large differences in overtopping results. Furthermore, it was shown that the calculation time for the second domain, which included the seawall, was too large, making this tool inadequate for the support of projects in these kinds of constructions.

Keywords: Overtopping, Seawall, Mase *et al.* (2013), influence factors, Numerical modelling, Coupling, IH-2VOF

Índice de Matérias

<i>Capítulo 1 - Introdução</i>	1
1.1. Enquadramento do tema.....	1
1.2. Objetivos e metodologia	2
1.3. Estrutura	3
<i>Capítulo 2 - Galgamento em Estruturas de proteção marginal</i>	5
2.1. Estruturas de Proteção Marginal.....	5
2.2. Galgamento	6
2.2.1. Definição e limites admissíveis	6
2.2.2. Fatores condicionantes	9
2.3. Cálculo do galgamento.....	11
2.3.1. Considerações gerais	11
2.3.2. Fórmula de Mase <i>et al.</i> (2013) e Masatoshi <i>et al.</i> (2019)	13
2.3.3. Fatores de redução do espraçamento e do galgamento.....	16
2.3.4. Fórmula de galgamento proposta no EuroTop	18
2.4. Modelo numérico IH-2VOF.....	18
2.4.1. Descrição do modelo.....	18
2.4.2. Discretização do domínio	21
2.4.3. Dados de entrada do modelo.....	25
2.4.4. Simulação e pós-processamento	27
<i>Capítulo 3 - Caso de Estudo</i>	29
3.1. Considerações gerais.....	29
3.2. Estrutura de proteção marginal.....	31
3.3. Agitação marítima.....	32
3.4. Nível do Mar.....	33
<i>Capítulo 4 - Modelação Numérica do caso de estudo</i>	35
4.1. Agitação e nível de mar.....	35
4.2. Discretização do domínio.....	37
4.2.1. Definição da geometria do perfil	38
4.2.2. Características da malha ortogonal	39
4.3. Dados de entrada do modelo numérico.....	46
4.4. Resultados do modelo numérico.....	48
<i>Capítulo 5 - Análise do galgamento</i>	57
5.1. Parâmetros de cálculo	57
5.2. Resultados do modelo	60
5.2.1. Resultados relativos aos parâmetros de base.....	60
5.2.2. Influência do fator de redução devido ao atrito	62
5.2.3. Influência do fator de redução devido ao ângulo de ataque da onda	67

5.2.4. Influência da modificação da fórmula de Mase <i>et al.</i> por Masatoshi <i>et al.</i> (2019)	72
5.3. Comparação de resultados com o manual EuroTop (2018)	74
<i>Capítulo 6 - Conclusões</i>	81
6.1. Considerações gerais.....	81
6.2. Desenvolvimentos Futuros.....	83
Bibliografia	85

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esporão situado na praia da Cova-Gala, Figueira da Foz.	5
Figura 2.2 - Defesa longitudinal aderente situada na praia da Cova-Gala, Figueira da Foz.	6
Figura 2.3 - Esquema do galgamento de uma estrutura.	7
Figura 2.4 - Galgamento "green water" (esq.) na Costa da Caparica, Portugal ; galgamento "white water" (dir.) em Cascais, Portugal.	7
Figura 2.5 - Tipos de rebentação das ondas.	10
Figura 2.6 - Quebra-mar em canal de ondas irregulares testado no LNEC, Portugal.	12
Figura 2.7 - Talude imaginário.	14
Figura 2.8 - Representação em planta do ângulo de incidência β .	17
Figura 2.9 - Interface do programa CORAL.	22
Figura 2.10 - Janela de verificação da <i>Mesh Quality</i> do IH2-VOF.	24
Figura 2.11 - Menu de interface (GUI) do IH2-VOF.	25
Figura 2.12 - Menu de pré-processamento do IH-2VOF.	26
Figura 3.1 - Troços do litoral português em situação de erosão costeira gravosa, no período entre 1958 e 2010.	29
Figura 3.2 - Localização geográfica da linha costeira na praia da Cova-Gala.	30
Figura 3.3 - Estrutura de proteção marginal em estudo (praia da Gala Cova, Figueira da Foz).	31
Figura 3.4 - Secção transversal da defesa aderente da praia da Cova-Gala.	32
Figura 3.5 - Ponto de coordenadas dos dados de agitação usados neste estudo (a uma profundidade de 14 m).	32
Figura 4.1 - Distribuição de casos de agitação marítima com β próximo de zero, para os intervalos considerados e utilizando as fórmulas de Mase <i>et al.</i> e EuroTop.	36
Figura 4.2 - Esquema da divisão do domínio geral da malha ortogonal em estudo.	38
Figura 4.3 - Discretização da malha 1, domínio D1.	40
Figura 4.4 - Discretização da malha 1, domínio D2.	41
Figura 4.5 - Discretização da malha 2, domínio D1.	42
Figura 4.6 - Discretização da malha 2, domínio D2.	42
Figura 4.7 - Discretização da malha 3, domínio D1.	44
Figura 4.8 - Discretização da malha 3, domínio D2.	44
Figura 4.9 - Representação esquemática das sondas ao longo do domínio D1.	46
Figura 4.10 - Representação esquemática das sondas ao longo do domínio D2.	47
Figura 4.11 - Variação da superfície livre nas sondas do domínio D1, malha 3.	50
Figura 4.12 - Instantes (e posições) em que se inicia a rebentação das ondas no domínio D1, malha 3.	51
Figura 4.13 - Série temporal da superfície livre na sonda de acoplamento do domínio D1 e a reconstruída na secção do batedor no domínio D2, para as malhas 1, 2 e 3.	52
Figura 4.14 - Diferença da elevação da superfície livre entre as séries temporais da sonda de acoplamento em D1 e da na secção de geração em D2, para as malhas 1, 2 e 3.	53
Figura 4.15 - Velocidades horizontais ao longo do tempo simulado, na sonda de acoplamento do domínio D1 e na secção do batedor no domínio D2.	53
Figura 4.16 - Velocidades verticais ao longo do tempo simulado, na sonda de acoplamento do domínio D1 e na secção do batedor no domínio D2, para as malhas 1, 2 e 3.	54
Figura 5.1 - Valores máximos e mínimos anuais de H_{m0} , entre 1952 e 2010.	58
Figura 5.2 - Valores máximos e mínimos anuais de T_p , entre 1952 e 2010.	58
Figura 5.3 - Variação anual máxima e mínima de Dir , entre 1952 e 2010.	59
Figura 5.4 - Variação anual máxima e mínima do NM , entre 1952 e 2010.	59
Figura 5.5 - Caudais médios galgados adimensionalizados, determinados segundo a fórmula de Mase <i>et al.</i> no período em análise.	61
Figura 5.6 - Percentagem de eventos de galgamento, do caudal de base, segundo diferentes limites de caudal.	62
Figura 5.7 - Caudais de galgamento adimensionais, determinados segundo Mase <i>et al.</i> , para valores de γf entre 0.65 e 0.75.	62
Figura 5.8 - Caudais de galgamento adimensionais, determinados segundo Mase <i>et al.</i> , para valores de γf entre 0.80 e 0.90.	63

Figura 5.9 - Caudais de galgamento adimensionalizado, determinados segundo Mase <i>et al.</i> , para γf entre 0.65 e 0.75 (representação logarítmica). -----	64
Figura 5.10 - Caudais de galgamento adimensionalizado, determinados segundo Mase <i>et al.</i> , para γf entre 0.80 e 0.90 (representação logarítmica). -----	64
Figura 5.11 - q obtido pela fórmula de Mase <i>et al.</i> para γf de 0.65 e 0.75. -----	65
Figura 5.12 - q obtido pela fórmulas de Mase <i>et al.</i> , para γf de 0.80 e 0.90. -----	65
Figura 5.13 - Distribuição dos eventos de galgamento por gama de caudais médios, para diferentes valores de γf . -----	66
Figura 5.14 - Caudais de galgamento calculados com Mase <i>et al.</i> , com e sem considerar a influência do fator de redução devido ao ângulo de ataque da onda (distribuição logarítmica).-----	67
Figura 5.15 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de $\gamma\beta$, entre 0.01 e 0.1 l/s/m.-----	69
Figura 5.16 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de $\gamma\beta$, entre 0.1 e 0.4 l/s/m. -----	69
Figura 5.17 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de $\gamma\beta$, entre 0.4 e 200 l/s/m.-----	69
Figura 5.18 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de $\gamma\beta$, superiores a 200 l/s/m.-----	70
Figura 5.19 - Variação do caudal por Mase <i>et al.</i> sem $\gamma\beta$, relativamente ao caudal com $\gamma\beta$, segundo a direção de incidência média. -----	71
Figura 5.20 - Percentagem de eventos com caudais de galgamento, q , nulos e não nulos, calculados com e sem a influência de $\gamma\beta$.-----	71
Figura 5.21 - Caudais de galgamento calculada por Mase <i>et al.</i> (2013) e por Masatoshi <i>et al.</i> (2019). ----	72
Figura 5.22 - Comparação de q obtido com as fórmulas de Mase <i>et al.</i> (2013) e de Masatoshi <i>et al.</i> (2019), para $\gamma f = 0.65$. -----	73
Figura 5.23 - Variação do caudal de galgamento, determinado segundo Masatoshi, em relação ao caudal determinado segundo Mase <i>et al.</i> .-----	74
Figura 5.24 - Caudal médio galgado adimensional para γf de 0.80, obtidos com a fórmula de Mase <i>et al.</i> , Masatoshi <i>et al.</i> e EuroTop. -----	75
Figura 5.25 - Distribuição logarítmica de q para γf de 0.80, calculado pela a fórmula de Mase <i>et al.</i> , Masatoshi <i>et al.</i> e EuroTop. -----	76
Figura 5.26 - Comparação de q segundo as fórmulas de Mase <i>et al.</i> (2013) e de EuroTop, para $\gamma f = 0.80$. -----	77
Figura 5.27 - Variação do q segundo Mase <i>et al.</i> relativamente a EuroTop, em ordem a Mase <i>et al.</i> .-----	77
Figura 5.28 - Comparação do nº de eventos de galgamento, segundo Mase <i>et al.</i> (M) e o manual EuroTop (ET), para diferentes valores de gama f , discretizados pelos limites de segurança admissíveis. -----	78
Figura 5.29 - Percentagem de eventos com q nulo e não nulo obtidos com as fórmulas de Mase <i>et al.</i> (M) e do EuroTop (ET), para um γf de 0.8. -----	79

Índice de Tabelas

Quadro 2.1 - Valores admissíveis de caudal médio de galgamento, com as respectivas consequências e danos associados.-----	8
Quadro 4.1 – Número de casos de agitação marítima com β próximo de zero, em cada intervalo considerado.-----	36
Quadro 4.2 - Casos de agitação selecionados para modelação em IH-2VOF.-----	37
Quadro 4.3 - Características dos meios porosos da defesa longitudinal e da face de praia em estudo. ----	39
Quadro 4.4 - Características das subzonas da malha 1, Domínio D1. -----	40
Quadro 4.5 - Características da subzonas da malha 1, Domínio D2.-----	41
Quadro 4.6 - Características da subzonas da malha 2, Domínio D1.-----	43
Quadro 4.7 - Características da subzonas da malha 2, Domínio D2.-----	43
Quadro 4.8 - Características da subzonas da malha 3, Domínio D1.-----	45
Quadro 4.9 - Características da subzonas da malha 3, Domínio D2.-----	45
Quadro 4.10 - Valores de verificação dos critérios de espaçamento, para as malhas 1, 2 e 3. -----	46
Quadro 4.11 - Posição das sondas do domínio D1.-----	47
Quadro 4.12 - Tempo de simulação, considerado na geração de ondas, para cada caso a simular. -----	48
Quadro 4.13 – Tempos de corrida dos casos simulados em IH-2VOF, segundo o domínio considerado. 49	
Quadro 5.1 – Valores máximos e mínimos de H_{m0} , T_p , Dir e NM usados no cálculo do galgamento.-----	60
Quadro 5.2 – Fatores de redução usados no cálculo do galgamento.-----	60
Quadro 5.3 - N° de eventos de galgamento por intervalos de caudal.-----	61
Quadro 5.4 - N° de eventos de galgamento por gama de caudais médios, para diferentes valores de γf .66	
Quadro 5.5 - N° de eventos de galgamento máximos registados, com o respetivo ano da sua ocorrência, para as diferentes gamas de valores de caudais, para os valores de γf em análise.-----	67
Quadro 5.6 - Número de eventos de galgamento por gama de caudais, com e sem $\gamma\beta$, número máximo anual de eventos de galgamento e respetivo ano.-----	68
Quadro 5.7 - N° de eventos de galgamento máximos registados, com a fórmula de Mase et al. (M) e do EuroTop (ET), com o respetivo ano da sua ocorrência.-----	78

Lista de Siglas, Acrónimos e Abreviaturas

Abreviaturas e Siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
COSMO	Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental
Dir	Direção média de incidência
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Lisboa
GTL	Grupo de Trabalho Litoral
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
IH	Instituto Hidrográfico
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NM	Nível do mar
NR	Nível do mar em repouso
p.e.	Por exemplo
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
Z.H.	Zero Hidrográfico

Lista de Símbolos

Símbolos

q	Caudal médio de galgamento	[l/s/m]
R_c	Distância entre a cota de coroamento e o nível de repouso do mar	[m]
R	Distância vertical entre o nível de repouso do mar e a cota máxima atingida pela onda incidente no talude da estrutura	[m]
H_{m0}	Altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro	[m]
$H_{1/3}$	Média de 1/3 das alturas significativas mais elevadas	[m]
T_P	Período de pico da onda	[s]
T_m	Período médio da onda	[s]
T_0	Período médio de 1/3 dos períodos significativos mais elevados	[s]
$T_{m-1,0}$	Período médio na face da estrutura entre dois momentos espectrais	[s]
L_0	Comprimento de onda em águas profundas	[m]
ξ_0	Número de Iribarren	[-]
g	Aceleração gravítica	[m/s ²]
$(R_{max})_{37\%,100}$	Espraçamento máximo da onda não excedido em 37% dos casos	[m]
$(R_{max})_{99\%,100}$	Espraçamento máximo da onda não excedido em 99% dos casos	[m]
$Q_{99\%}$	Caudal de galgamento não excedido em 99% dos casos	[m ³ /s/m]
γ_f	Fator de redução do galgamento devido ao atrito	[-]
γ_β	Fator de redução do galgamento devido à declividade da onda	[-]
β	Ângulo de ataque da onda	[°]
$R_{u2\%}$	Espraçamento excedido por 2% das ondas incidentes	[m]
u	Campo das velocidades instantâneas em escoamentos turbulentos	[-]
p	Campo das pressões em escoamentos turbulentos	[-]
k	Energia cinética	[-]
ε	Rácio de dissipação turbulenta	[-]
n	Porosidade	[-]

α	Coefficiente de fricção linear	[-]
β	Coefficiente de fricção não-linear	[-]
C_A	Coefficiente de massa adicionada	[-]
D_{50}	Diâmetro de corte	[m]
$\Delta_{\max,x}$ e $\Delta_{\max,y}$	Espaçamento máximo da célula, na direção x ou y , respetivamente	[m]
$\Delta_{\min,x}$ e $\Delta_{\min,y}$	Espaçamento mínimo da célula, na direção x ou y , respetivamente	[m]
F_S	Frequência de amostragem	[Hz]

Índices e Operadores

$\Delta(*)$	Variação de grandezas físicas
$n(*)$	Quantidade numa direção

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Enquadramento do tema

O litoral português apresenta um valor natural, económico e cultural único e de importância amplamente reconhecida. No entanto, o conjunto de atividades decorrentes ao longo da sua extensão provocou uma degradação significativa desta zona, devida primariamente à erosão costeira, chegando a comprometer largos troços costeiros. A ação do ser humano toma um papel significativo na atual configuração do litoral: o aumento da densidade populacional nas localidades próximas de zonas costeiras leva ao crescimento económico e social nestas localidades que (na generalidade dos casos) é incompatível com a dinâmica natural das praias (Santos et al. 2014). Efetivamente, já em 2014 o relatório elaborado pelo Grupo de Trabalho Litoral (GTL), revelou a tendência preocupante da diminuição significativa da largura das praias (ou mesmo o seu desaparecimento temporário ou permanente) posicionadas em frente destas estruturas, no litoral oeste português (W1).

Este dinamismo costeiro pode levar à ocorrência de galgamentos de estruturas de proteção costeira e dunas em situações de temporal que podem causar inúmeros danos, podendo mesmo resultar na perda de vidas humanas ou na destruição de estruturas próximas da linha de costa. Desta forma, a gestão das zonas costeiras próximas de aglomerados populacionais, no seu limite, deve considerar a implementação de medidas sustentáveis que mitiguem os fenómenos que afetam o litoral de forma mais gravosa, de que são exemplo a implementação de estruturas de proteção costeira.

A natureza das estruturas de proteção a dimensionar depende da função que esta irá desempenhar durante a sua vida útil e das condições de agitação marítima presentes no local. As estruturas de proteção marginal ou defesas longitudinais aderentes, que têm como principal função a mitigação do galgamento, são estruturas paralelas à costa. As defesas longitudinais aderentes podem ser classificadas pela sua permeabilidade, o material que as compõe e, dependendo das condições de agitação exigidas no seu dimensionamento, apresentar distintas configurações. Usualmente uma defesa aderente é composta três elementos: o seu núcleo, o filtro e o manto exterior.

As defesas aderentes pretendem servir de proteção e abrigo contra inundações, devidas ao galgamento (Allsop, Bruce, Pullen, & van der Meer, 2008), dissipando a energia das ondas na sua interação com a estrutura, e em zonas fortemente afetadas pela erosão costeira têm como objetivo minimizar o risco de ocorrerem estragos em estradas, passadiços ou edifícios nas suas proximidades. O galgamento, volume de água que transpõe o coroamento da estrutura de proteção marginal por unidade de tempo, é determinado em função das condições de agitação marítima incidente e das características da estrutura.

As estruturas de proteção marginal devem ser dimensionadas de modo a suportar um certo caudal admissível, que varia consoante a função da estrutura, sendo o volume de caudal galgado permitido variável, consoante a importância da zona a proteger. Existem também condicionantes de natureza económica que devem ser tidas em conta no dimensionamento da proteção marginal face ao galgamento, pois caso apenas se permita a passagem de volumes de galgamento pequenos, será necessário elevar a cota do coroamento da estrutura ou alterar a sua geometria, o que pode acarretar custos adicionais para a sua construção.

O método de cálculo do caudal galgado, para determinadas condições de agitação, baseia-se atualmente na aplicação de ferramentas empíricas e semi-empíricas. Dadas as limitações de aplicação das fórmulas, é em alguns casos realizada a sua modelação física. No entanto, têm aumentado a utilização de modelos numéricos, nos últimos anos, devido à sua capacidade de reproduzir, de forma viável, as interações entre as ondas e a estrutura, embora o tempo de cálculo seja ainda um fator que limite a sua aplicação (Brito 2007).

Nesta dissertação é realizado o estudo do galgamento na estrutura de defesa aderente na praia da Gala-Cova (Figueira da Foz), identificada pelo GTL como uma das situações mais críticas de galgamento no litoral português, devido aos efeitos da progressiva degradação do cordão dunar anexo à defesa aderente, em conjunto com fatores externos, como o aumento da probabilidade de condições de temporal e a subida média do nível do mar, que contribuíram para o aumento do número de eventos de galgamento nos últimos 50 anos (Santos et al. 2014).

1.2. Objetivos e metodologia

Nesta dissertação, pretende-se calcular o galgamento afeto a uma estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, a defesa longitudinal na praia da Cova-Gala, pertencente ao concelho da Figueira da Foz. Em particular, pretende-se calcular o caudal médio galgado entre 1952 e 2010 nesta estrutura e fazer uma análise de sensibilidade a alguns parâmetros de cálculo. Para tal, utilizaram-se fórmulas de cálculo semi-empíricas, particularmente a de Mase *et al.* (2013), e o modelo numérico IH-2VOF (2012).

O plano de trabalhos, realizado ao longo da dissertação, consta de:

- Revisão da literatura inerente aos assuntos a desenvolver;
- Análise dos dados de agitação existentes na zona e das fórmulas empíricas, aplicáveis ao cálculo do galgamento, para o caso de estudo;

- Análise do método de aplicação do modelo numérico IH-2VOF para a simulação do caudal de galgamento, aplicação à geometria da defesa longitudinal aderente, descrição dos domínios a aplicar no estudo, e simulação numérica;
- Aplicação da fórmula semi-empírica de Mase *et al.*, para os 58 anos de dados, e análise de resultados; análise dos caudais resultantes obtidos com a fórmula semi-empírica; análise de sensibilidade do caudal médio galgado aos parâmetros da fórmula e comparação de resultados.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se estruturada em 6 capítulos (incluindo este capítulo), contendo cada um destes capítulos uma breve introdução teórica. O capítulo 1 serve de enquadramento geral da dissertação, com uma breve exposição do tema a ser desenvolvido, com a apresentação dos objetivos e metodologia do trabalho.

O capítulo 2 divide-se em quatro secções, onde se descrevem sucintamente os tipos de estruturas de proteção marginal, o fenómeno do galgamento, os seus fatores condicionantes e limites de segurança admissíveis e os diferentes métodos de cálculo do caudal galgado, em particular, a fórmula de Mase *et al.* Descrevem-se ainda as bases matemáticas do modelo numérico IH-2VOF, assim como os procedimentos necessários à simulação dos casos de agitação marítima.

O capítulo 3 é dedicado ao caso de estudo, nomeadamente ao enquadramento geográfico e demográfico da zona de interesse, sendo realizada uma análise do perfil transversal da estrutura de proteção marginal e referidos os dados de agitação marítima considerados na análise do galgamento.

O capítulo 4 dedica-se à aplicação do modelo numérico IH-2VOF para o cálculo do galgamento na defesa longitudinal aderente da Cova-Gala, com o objetivo de verificar a sua aplicabilidade na calibração dos coeficientes de redução do galgamento, por comparação dos valores de caudal determinados segundo as fórmulas empíricas consideradas no seguinte capítulo. Para tal são apresentados os dados de entrada, o(s) domínio(s) de simulação e o seu acoplamento, as características da malha e os resultados da simulação para três casos de agitação marítima simulados.

No capítulo 5 realiza-se o cálculo do galgamento para os 58 anos de dados de agitação e nível de mar obtidos pela fórmula de Mase *et al.* (2013). Faz-se uma análise de sensibilidade dos resultados de caudal galgado aos parâmetros de influência do galgamento, nomeadamente dos coeficientes de redução devidos ao atrito e ao ângulo de ataque da onda. Os caudais calculados foram ainda comparados com os caudais obtidos pela alteração da fórmula, proposta por Masatoshi *et al.* em 2019, e com a fórmula do manual EuroTop.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido e indica alguns possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Galgamento em Estruturas de proteção marginal

2.1. Estruturas de Proteção Marginal

Ao longo do litoral português, é possível identificar vários casos de praias afetadas pela erosão, nas quais foram construídas estruturas, de modo a proteger as frentes marítimas de possíveis inundações e reter os sedimentos a sotamar (definida tendo em conta a direção da agitação mais frequente). Os principais tipos de estruturas marítimas que servem de proteção à zona costeira portuguesa são os esporões e as estruturas de proteção marginal.

As primeiras estruturas são aproximadamente perpendiculares à costa e têm como função primária promover a retenção de sedimentos a barlar da estrutura, de forma a mitigar o processo de erosão costeira. Esta "capacidade" de controlo da erosão é um fator de acrescida dificuldade, pois encontra-se dependente de fenómenos complexos como os efeitos hidrodinâmicos gerados, a geologia e morfologia da costa e a estabilidade da estrutura (Sousa, 2011). Os esporões são geralmente construídos com enrocamento. Na Figura 2.1 apresenta-se o exemplo de um esporão localizado na região da Figueira da Foz.



Figura 2.1 - Esporão situado na praia da Cova-Gala, Figueira da Foz.

As estruturas de proteção marginal ou de defesa longitudinal aderente são, por outro lado, construídas paralelamente à costa com o objetivo de reduzir os efeitos provocados pelo galgamento das ondas nas frentes marítimas, isto é, reduzir o risco de ocorrência de inundações nas áreas protegidas pela estrutura, trazendo o benefício adicional de impedir o recuo da linha de costa nestas zonas. As estruturas

de defesa aderente, ou *seawalls* na literatura anglo-saxónica, podem servir de proteção a passeios, estradas e habitações localizadas junto às praias onde se localizam estas estruturas. Estas estruturas podem ser impermeáveis ou permeáveis, de enrocamento ou outros materiais. Na Figura 2.2 apresenta-se, como exemplo, a defesa longitudinal aderente localizada na praia de Cova-Gala, a sul da Figueira da Foz.



Figura 2.2 – Defesa longitudinal aderente situada na praia da Cova-Gala, Figueira da Foz.

2.2. Galgamento

2.2.1. Definição e limites admissíveis

A ocorrência do galgamento está relacionada com o espraçamento (ou *runup*, na literatura anglo-saxónica), **R**, dado pela distância vertical entre o nível de repouso do mar, **NR**, e a cota máxima atingida pela onda incidente no talude da estrutura. O espraçamento é originado pela movimentação ascendente de uma massa de água, após rebentação da onda incidente, sendo influenciado pelas características da onda incidente (especificamente a sua altura e período) e da sua interação com a estrutura, tal como pela inclinação da face de praia do talude (Bairrão, 2014; Pernial, 2017).

Após a incidência da onda, parte da sua energia cinética total é perdida, sendo a restante energia transformada em energia potencial, sob a forma do escoamento que se dá sobre a estrutura. Caso esta energia não seja completamente transformada, o nível de espraçamento associado ao escoamento pode superar a cota máxima da estrutura, ocorrendo nesse momento o transporte da massa de água por cima do seu coroamento (Brito, 2007).

Este fenómeno físico designa-se de galgamento e é causado por condições de agitação marítima, regulares ou tempestuosas, e contabilizado através do caudal médio, **q**, que galga o coroamento da estrutura marítima, por metro linear da sua largura (Figura 2.3). O caudal médio galgado é usualmente representado em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $\text{l}/\text{s}/\text{m}$.

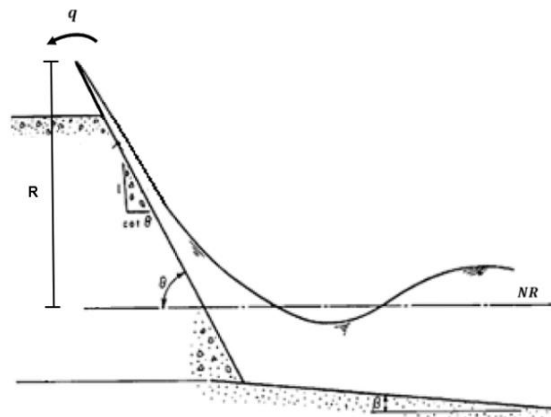


Figura 2.3 - Esquema do galgamento de uma estrutura. (adaptado de Coastal Engineering Research Center, 1984)

O galgamento pode ser classificado em diferentes tipos. Caso a passagem do caudal galgado se dê sob forma de uma “lâmina” de água sobre o coroamento, o galgamento é do tipo *green water* (Figura 2.4, esquerda) Outro tipo de galgamento, designado *white water*, observado à direita na Figura 2.4, tende a ocorrer quando a rebentação de ondas na face frontal da estrutura produz um grande volume de salpicos, podendo estas partículas ser transportadas para a área protegida pela estrutura quando projetadas ou pela ação do vento (Van der Meer et al., 2018).



Figura 2.4 - Galgamento *green water* (esq.) na Costa da Caparica, Portugal. (Pernial, 2017); galgamento *white water* (dir.) em Cascais, Portugal. (Brito, 2007)

O limite máximo admissível para o caudal médio de galgamento depende da finalidade da estrutura. Desta forma, no seu dimensionamento, devem-se ter em conta as condições usuais de serviço da zona protegida pela estrutura e os valores usualmente considerados como limite dessa utilização. Por exemplo, o caudal galgado admissível para estradas e edificações na proximidade de uma estrutura de proteção marginal é diferente do valor para a segurança de pessoas. O Quadro 2.1 apresenta os valores máximos de

segurança para estruturas de proteção marginal, segundo a sua função e nível de dano associado, em função caudal médio de galgamento verificado (adaptado de T. Pullen et al. 2007).

Quadro 2.1 - Valores admissíveis de caudal médio de galgamento, com as respectivas consequências e danos associados. (T. Pullen et al. 2007)

Categoria de segurança	Consequências e danos associados	q (l/s/m)
Estruturas de defesa com talude no tardo	Sem danos, mesmo sem a proteção correta do coroamento e do tardo do dique.	0.1
	Sem danos no coroamento e o tardo, para dique de argila coberto por relva.	1 a 10
	Sem danos, caso o coroamento e o tardo estejam bem protegidos.	50 a 200
Estruturas de defesa frontal aderente com enrocamento ou berma	Danos na zonas de circulação posteriores à estrutura, com berma não pavimentada ou revestida.	50
	Danos em zonas de circulação com berma ligeiramente protegidas ou cobertas por relva.	200
Pedestres	Pedestres sem visão clara das ondas incidentes, facilmente incomodados, assustados ou sem roupas de proteção contra a água; Circulação por caminhos estreitos ou na proximidade de zonas com risco de queda.	0.03 (*)
	Pedestres atentos, com observação clara do mar, não incomodados ou assustados facilmente, que toleram sem dificuldade se ficarem molhados; Circulação por caminhos largos.	0.1
	Pessoal treinado, protegido por calçado e restante equipamento adequado para travessias em zonas molhadas, apenas com níveis de galgamento baixos, sem queda de jatos de água; Perigo reduzido de queda no mar.	1 a 10
Embarcações e equipamentos protegidos pela estrutura	Danos em equipamentos distanciados 5 a 10 metros da estrutura.	0.4
	Danos em elementos estruturais de edificios.	1
	Afundamento de pequenas embarcações situadas a 5-10 metros de distância da estrutura; Danos apenas em embarcações maiores (navios).	10
	Danos significativos ou afundamento de navios de grandes dimensões.	50
Veículos	Condução a baixa velocidade, galgamento em escoamentos de baixa profundidade, sem queda de jatos de água; Veículos não imersos.	0.01 a 0.05
	Condução a uma velocidade alta ou moderada, escoamento de galgamento impulsivo, com queda ou presença de jatos de água com grandes velocidades.	10 a 50

(*) Limite de precaução, exclusivamente nas condições mencionadas.

2.2.2. Fatores condicionantes

O galgamento sobre uma estrutura de defesa aderente depende das características da estrutura sobre a qual as ondas incidem, das condições de agitação marítima no local e do nível médio da água. O correto dimensionamento da estrutura deve manter os valores do caudal médio galgado abaixo dos limites de segurança admissíveis.

A agitação marítima local determina a energia das ondas incidentes na estrutura de proteção, sendo parte dissipada (essencialmente por rebentação), parte refletida e parte transmitida (através da estrutura, se esta é porosa, ou por galgamento). Como o objetivo de uma estrutura marítima é reduzir a energia transmitida, deve ser dimensionada de modo a potenciar a dissipação e/ou reflexão da energia incidente.

A transmissão por galgamento é o tema em estudo desta dissertação e está relacionada diretamente com o nível de espraçamento, sendo influenciado, como referido, pelas características geométricas da estrutura, especialmente a porosidade dos mantos e o declive do talude. Estas características, por sua vez, determinam a forma de rebentação das ondas no seu manto (principal forma de dissipação da energia). Por exemplo, estruturas de proteção marginal com maiores inclinações no talude da face frontal podem induzir a uma rebentação das ondas incidentes em colapso, levando a uma maior dissipação de energia e consequentemente a uma redução do nível de espraçamento e redução da transmissão por galgamento. Por outro lado, uma estrutura em talude com um manto de maior porosidade pode aumentar a dissipação da energia na estrutura e reduzir a transmissão por galgamento.

A agitação marítima local é definida pelo seu período, altura de onda e direção de incidência. A altura frequentemente considerada no cálculo do galgamento é a altura significativa da onda incidente na base da estrutura, H_{m0} , também designada por altura espectral significativa, determinada com recurso uma análise espectral de uma série temporal de agitação. Outro parâmetro também utilizado é a altura significativa, $H_{1/3}$, calculada pela média do terço das alturas de onda maiores de uma série temporal de agitação utilizando o método de passagem por zero para determinar a altura de onda e período de cada onda do registo, conhecido como análise temporal. Note-se que ambos os parâmetros produzem resultados semelhantes em grandes profundidades, mas podem apresentar diferenças de aproximadamente 10% a 15% em águas pouco profundas. A adoção do parâmetro H_{m0} para o cálculo do galgamento nas fórmulas empíricas consideradas, deve-se ao facto de ser esta a altura utilizada na definição da fórmula. Quanto aos períodos de onda, os parâmetros mais utilizados são o período de pico T_p (valor do período correspondente à componente de maior energia do espectro), o período médio, T_m (média de período de todas as ondas de um registo calculado através da análise temporal) (W2) e o período significativo, T_0 (período correspondente à média do terço dos períodos mais altos do registo, utilizando a análise temporal). Algumas fórmulas de cálculo do espraçamento e do galgamento utilizam ainda o valor $T_{m-1,0}$, período médio

espectral, dado pela razão entre os momentos espectrais m_{-1} e m_0 , parâmetro que pode ser obtido através da expressão que o relaciona com o período de pico pela relação $T_{m-1,0} = T_p/1.1$ (Mase, Tamada, Yasuda, Hedges, & Reis, 2013). Nas fórmulas do galgamento considera-se que a agitação é perpendicular à estrutura, por ser esta a direção que, em princípio, será mais gravosa em termos de galgamento.

A declividade da onda (S_0), relacionada com estes parâmetros, indica-nos a relação entre a altura de onda significativa e o comprimento de onda em águas profundas (L_0):

$$S_0 = H_{m0}/L_0 \quad (2.1)$$

em que $L_0 = gT_0^2/2\pi$.

A acentuada diminuição da profundidade à medida que a onda se aproxima da linha de costa provoca uma alteração brusca na sua celeridade e da sua altura, até atingir o limite máximo de declividade possível, tornando-se instável e libertando a energia por meio da rebentação. Caso a rebentação das ondas se dê na estrutura, o fator determinante da dissipação da energia por rebentação é o declive do talude onde se dá essa rebentação, além da declividade da própria onda. Conhecidos estes parâmetros, é possível calcular um parâmetro adimensional, o número de *Iribarren* (ou *Surf Similarity Parameter*, na literatura anglo-saxónica), ξ_0 , que está relacionado com o tipo de rebentação e com a dissipação de energia por rebentação que, da menor para a maior se pode dividir em: progressiva (para $\xi_0 < 0.5$), mergulhante (para $0.5 < \xi_0 < 3$), de fundo (para $3 \leq \xi_0 \leq 3.5$) ou colapsante (para $\xi_0 > 3.5$), como ilustrado na Figura 2.5.

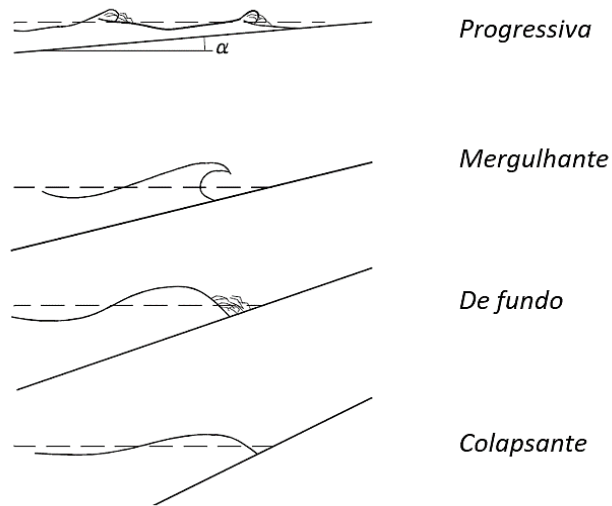


Figura 2.5 - Tipos de rebentação das ondas. (adaptado de USACE 2011)

A profundidade no pé da estrutura é ainda determinante na resposta da estrutura à agitação e, consequentemente, do galgamento. Esta profundidade depende da distância entre o pé da estrutura ao nível do mar em repouso e do nível do mar, soma da maré astronómica e meteorológica. Efetivamente, este fenómeno é intensificado quando se associa a condições de temporal os mais altos níveis de mar, ou seja, condições de preia-mar com sobrelevação, já que se reduz a distância entre a cota de coroamento e o nível de mar em repouso (Brito, 2007).

2.3. Cálculo do galgamento

2.3.1. Considerações gerais

O dimensionamento de uma estrutura marítima ou de proteção costeira é usualmente acompanhado de uma análise da resposta da estrutura face a diversas condições de agitação marítima locais. No caso de estruturas de proteção marginal, o dimensionamento passa pelo cálculo do caudal médio de galgamento e pela verificação de que é inferior ao nível definido para a segurança de pessoas e bens protegidos pela estrutura. Esta análise do galgamento pode ser realizada com recurso a formulações empíricas ou semi-empíricas, redes neuronais, modelos físicos ou modelos numéricos.

Na fase de anteprojecto, usam-se normalmente as fórmulas e/ou as redes neuronais, caso sejam aplicáveis. As fórmulas empíricas utilizadas para calcular o galgamento de dado tipo de estrutura são normalmente baseadas em dados provenientes de ensaios experimentais e podem ser agrupadas de acordo com os seus dados de base. Owen (1980) propôs a formulação genérica expressa na equação 2.2, na qual o caudal médio de galgamento diminui proporcionalmente ao aumento da distância entre o nível de repouso da água e a cota de coroamento da estrutura, *Crest freeboard* ou **R_c**, e depende ainda da altura de onda significativa (em metros) em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro (**m₀**), da aceleração gravítica, **g**, e de dois coeficientes empíricos, **A** e **B**.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = A \cdot \exp\left(-B \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad (2.2)$$

A grande maioria das fórmulas para determinação do galgamento foi desenvolvida para níveis do mar em repouso situados acima do nível do pé da estrutura, como é o caso das fórmulas apresentadas no manual EuroTop (Van der Meer et al., 2018). Para o caso de estruturas de defesa aderente construídas em terra ou em cotas de muito baixas profundidades, a fórmula de Mase *et al.* (2013) é atualmente a única que

permite efetuar o cálculo do espraçamento e do caudal médio galgado, e como tal será descrita em detalhe na secção 2.3.2. As redes neuronais têm sido aplicadas ao estudo do galgamento por permitirem estabelecer uma ligação entre as causas do fenómeno e os efeitos por ele produzidos, sem definir a relação física entre as múltiplas variáveis. Uma ferramenta baseada em redes neuronais muito utilizada para o cálculo do galgamento é a NN_OVERTOPPING2, desenvolvida no âmbito do projeto CLASH (Steendam et al., 2005). No entanto, esta rede neuronal não é aplicável a estruturas de defesa marginal construídas em terra ou em cotas de muito baixas profundidades.

A modelação física é um método fiável e validado para a determinação de caudais de galgamento em estruturas costeiras com geometrias irregulares, sendo muito utilizado para o estudo de aplicações a casos de estudo concretos e para o desenvolvimento de fórmulas. Os modelos físicos para cálculo do galgamento representam, à escala reduzida, a secção transversal da estrutura em canal de ondas (modelos em 2D, como observado na Figura 2.6) ou a estrutura e os fundos adjacentes (modelos em 3D num tanque de ondas), a escalas geométricas tipicamente compreendidas entre 1:30 e 1:60 (Van der Meer et al., 2018). Os ensaios em modelo físico reproduzem de forma fiável grande parte dos fenómenos complexos que afetam o galgamento, mas podem estar sujeitos a erros devidos à incorreta reprodução à escala da geometria da estrutura, da agitação ou dos fenómenos da interação entre a agitação e a estrutura, ou ainda erros causados por medições incorretas. Para além destes efeitos, os modelos físicos exigem infraestruturas especializadas para a sua utilização, com custos de construção e pessoal especializado associados à sua utilização (Kamphuis, 1999; Van der Meer et al., 2018).



Figura 2.6 - Quebra-mar em canal de ondas irregulares testado no LNEC, Portugal. (W3)

A modelação numérica está agora a tornar-se mais relevante, pela sua flexibilidade na modelação de diferentes estruturas e condições de agitação e pela melhoria dos meios de cálculo. Um modelo numérico é muito menos restritivo ao nível da alteração da geometria da estrutura e, uma vez calibrado e/ou validado, permite obter uma análise detalhada do galgamento, de parâmetros instantâneos (p.e. velocidades, pressões e a variação da superfície livre) e integrados (p.e. volumes de galgamento individuais ou médios) (Baker, Canada, Cornett, & Canada, 2018; Kamphuis, 1999). No entanto, quanto mais precisos os modelos, maior será o tempo de simulação. Assim, devido ao elevado tempo de processamento de simulação, os modelos são muitas vezes utilizados na sua forma 2D. Para que as simulações efetuadas sejam realistas, os modelos devem ser capazes de representar todos os fenómenos hidrodinâmicos relevantes e de modelar um número de ondas suficientes para gerar resultados consistentes (Reis e Neves, 2011).

Um modelo muito utilizado para o estudo da interação entre onda e estruturas porosas, como é o caso do galgamento de uma estrutura de defesa aderente constituída por blocos de enrocamento, é o modelo IH-2VOF (Lara, Ruju, & Losada, 2011). Este modelo é um modelo bidimensional que resolve as equações completas de Reynolds na vertical (RANS) utilizando o método de diferenças finitas, em que a turbulência é gerada por um modelo $k - \epsilon$ tanto na zona do fluído como no meio poroso (W4).

2.3.2. Fórmula de Mase *et al.* (2013) e Masatoshi *et al.* (2019)

A fórmula de Mase *et al.* (2013) permite o cálculo do espraçamento e do galgamento de estruturas localizadas junto ou acima da linha de costa. Estes autores adotam o conceito de declive imaginário para avaliar a posição da rebentação e calcular o nível de espraçamento ou o caudal médio galgado. A Figura 2.7 mostra o conceito de talude imaginário utilizado na fórmula e definido por uma reta, inicialmente idealizada por Saville em 1958, com ponto no início na posição de rebentação da onda e ponto limite o nível de espraçamento, isto é, o nível de subida da onda na face da estrutura, considerada de talude infinito.

Esta reta foi ajustada por Mase *et al.* (2013) com base em dois conjuntos de dados experimentais, que permitiram obter previsões de espraçamento mais precisas considerando o declive da praia e o da estrutura. O primeiro grupo corresponde a ensaios realizados num tanque de ondas de dimensões [50 x 1.2 x 1] (m), com três declives de fundo e dois declives da estrutura de defesa, para ensaios de agitação correspondentes a aproximadamente 200 ondas e utilizando uma escala de 1:50. Adicionalmente, foram usados dados de ensaios conduzidos por Mase *et al.* (2004) de uma estrutura de defesa aderente à escala 1:45, destinada a avaliar as características de espraçamento das ondas em estruturas marginais localizadas

próximas da linha de costa. Estes ensaios permitiram determinar os coeficientes empíricos da fórmula que se adequam ao cálculo do caudal galgado em estruturas marginais, localizadas na costa ou em águas pouco profundas.

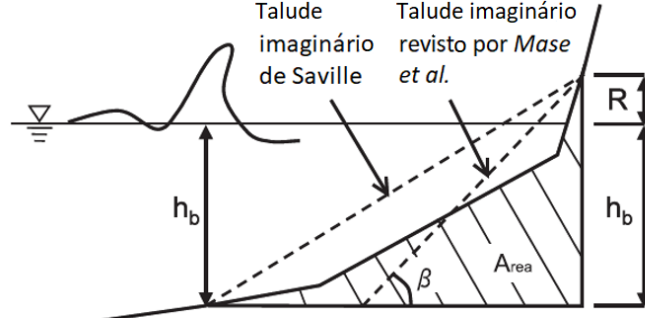


Figura 2.7 - Talude imaginário. (adaptado de Mase et al. 2013)

O declive imaginário, $\cotan \beta$, é dado por:

$$\cotan(\beta) = \frac{2 * A_{rea}}{(h_b + R)^2} \quad (2.3)$$

onde A_{rea} é a área da secção transversal da estrutura e da face de praia entre o local de rebentação das ondas e o nível de espraçamento, com condições de agitação irregulares, e β é o ângulo imaginário combinado dos taludes da face de praia e da defesa longitudinal (medido a partir da horizontal). A variável h_b é a profundidade onde a altura de onda significativa se reduz para 7%. Como é necessário conhecer o declive imaginário para calcular o espraçamento e vice-versa, esta variável é calculada iterativamente.

O nível de espraçamento excedido por 2% das ondas incidentes na estrutura, $R_{u2\%}$, é dado por:

$$R_{u2\%} = H_o [2.99 - 2.73 \exp(-0.57 * \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{H_o/L_o}})] \quad (2.4)$$

A determinação deste parâmetro permite obter então o espraçamento máximo não excedido em 37% e 99%, R_{max} , tal como o respetivo caudal médio galgado, q , ambos obtidos através das equações 2.5 e 2.6, propostas por Mase *et al.* (2013):

$$\frac{q}{\sqrt{gH_o^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{max}}{H_o}\right)^{3/2} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_o}\right) / \left(\frac{R_{max}}{H_o}\right)\right]^{3.200} & \text{para } 0 \leq R_c < R_{max} \\ 0 & \text{para } R_{max} \leq R_c \end{cases} \quad (2.5)$$

com $(R_{max})_{37\%,100} = 1.09 R_{u2\%}$

$$\frac{q}{\sqrt{gH_0^3}} = \begin{cases} 0.018 \left(\frac{R_{max}}{H_0}\right)^{3/2} \left[1 - \left(\frac{R_c}{H_0}\right) / \left(\frac{R_{max}}{H_0}\right)\right]^{6.240} & \text{para } 0 \leq R_c < R_{max} \\ 0 & \text{para } R_{max} \leq R_c \end{cases} \quad (2.6)$$

com $(R_{max})_{99\%,100} = 1.54 R_{u2\%}$, em que:

q – Caudal de galgamento, em m³/s/m;

H₀ – altura de onda ao largo, em m;

R_c – distância entre a cota de coroamento da estrutura e o nível de repouso, em m;

R_{max} – nível de espraimento máximo, em m.

Como se pode verificar, quando o nível máximo atingido pelo espraimento apresenta uma cota superior à definida pela distância **R_c**, ocorre o galgamento da estrutura, sendo então calculado o valor do caudal médio galgado, por metro de largura da estrutura.

Em 2019, a fórmula de galgamento apresentada acima foi reformulada, ao nível do $(R_{max})_{99\%,100}$, por (Masatoshi et al., 2019), tendo sido propostos novos valores para os coeficientes A e B, em função do valor de X:

$$X = \log\left(1 - \frac{R_c}{(R_{max})_{99\%,100}}\right),$$

- se $X \geq -0.5$ $\begin{cases} A = 0.018 \\ B = 6.24 \end{cases}$
- se $-1.4 \leq X < -0.5$ $\begin{cases} A = e^{-3.27-2.91 * |X^2|} \\ B = 5.82 * X + 9.15 \end{cases}$
- se $X < -1.4$ $\begin{cases} A = 0.00013 \\ B = 1 \end{cases}$

(2.7)

Excetuando a alteração ao nível destes coeficientes, a formulação previamente considerada em Mase *et al.* (2013) mantém a mesma estrutura. Note-se que esta correção não se aplica ao espraimento excedido em 37%, afetando exclusivamente o valor do caudal de galgamento **Q_{99%}**.

2.3.3. Fatores de redução do espraçamento e do galgamento

O espraçamento e, conseqüentemente, o galgamento, são afetados por fatores normalmente não incluídos diretamente nas fórmulas. Assim, Pullen *et al.* (2007) propõe a aplicação de coeficientes de redução a aplicar ao cálculo do espraçamento e/ou galgamento para ter em conta efeitos não considerados nas fórmulas aplicadas no seu cálculo. Dentro estes, destacam-se o coeficiente de atrito, que tem em conta o efeito da rugosidade e da permeabilidade do material do manto, o coeficiente que tem em conta o efeito da direção de ataque das ondas e o coeficiente que tem em conta a localização da berma.

O coeficiente afetado pelo atrito traduz o efeito da redução do espraçamento, e conseqüentemente do galgamento, devido à rugosidade do fundo e do talude da estrutura marítima (na zona onde se dá o espraçamento da onda). Este fator de redução devido ao atrito é representado por γ_f .

Para taludes lisos (nos quais o atrito é desprezável), considera-se $\gamma_f = 1$, e o espraçamento e possível galgamento não são afetados. Este valor vai diminuindo progressivamente à medida que o atrito aumenta, resultando numa redução do espraçamento (Van der Meer *et al.*, 2018). A experiência do projetista dita a gama de valores a considerar, que pode ainda ser calibrada através de modelação física ou numérica.

Outro coeficiente relevante no cálculo do caudal de galgamento é o que tem em conta o efeito da direção de incidência da onda na estrutura, representado por γ_β (sendo β o ângulo entre a direção de incidência das ondas e a perpendicular ao eixo longitudinal da estrutura - Figura 2.8). Este ângulo tem um impacto significativo na intensidade do galgamento, sendo usualmente considerado nas formulações empíricas de cálculo do espraçamento e galgamento como o seu valor mais crítico aquele em que as ondas incidem normal à estrutura de proteção, ou seja $\beta = 0^\circ$.

Caso β seja diferente de zero, o valor de γ_β pode ser calculado pela equação 2.8:

$$\begin{cases} \gamma_\beta = 1 - 0.0063 |\beta| & (\text{para } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ) \\ \gamma_\beta = 1 - 0.0063 * 80 & (\text{para } |\beta| > 80^\circ) \end{cases} \quad (2.8)$$

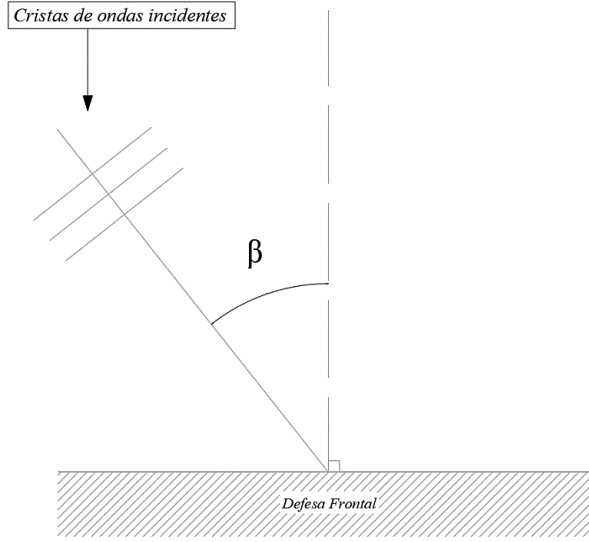


Figura 2.8 – Representação em planta do ângulo de incidência β .

No caso de $80^\circ \leq |\beta| \leq 110^\circ$, Pullen *et al.* (2018) sugerem o ajuste da altura e o período das ondas de acordo com a equação 2.9, e no caso de $|\beta| > 110^\circ$ assume-se um valor de $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

$$\begin{cases} H_{m0} * \frac{110 - |\beta|}{30} \\ T_{m0} * \sqrt{\frac{110 - |\beta|}{30}} \end{cases} \quad (2.9)$$

Por fim, caso haja uma berma de coroamento permeável, o valor do espraçamento máximo deve ser afetado pela aplicação de um coeficiente de redução, γ_b , que traduz a influência da berma no galgamento, tido em conta caso o coroamento (ou berma intermédia) da estrutura se situe acima de duas vezes a altura espectral significativa da onda e abaixo do nível espraçamento excedido por 2% das ondas incidentes, dado por:

$$\begin{cases} \gamma_b = 3.06 * e^{\left(\frac{-1.5 * G_c}{H_{m0}}\right)} \\ \gamma_b = 1 \end{cases} \quad \left(\text{se } \gamma_b > 1 \text{ ou } \frac{G_c}{H_{m0}} < 0.75 \right) \quad (2.10)$$

sendo G_c a largura da berma.

2.3.4. Fórmula de galgamento proposta no EuroTop

O EuroTop - *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures* foi publicado originalmente em 2007, funcionando como um guia a nível europeu das técnicas correntes de previsão do galgamento para estruturas marítimas e costeiras (estruturas de defesa aderente, quebra-mares, etc.), e permitindo assim a realização de análises do comportamento face ao galgamento a pequeno ou longo prazo. O manual sofreu algumas reformulações desde que foi redigido, sendo a versão de 2018 a última revisão apresentada (W4).

Para uma defesa aderente em talude de enrocamento, o Eurotop propõe a determinação do caudal médio de galgamento pela seguinte fórmula (Van der Meer et al., 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g * H_{m0}^3}} = 0.1035 \cdot \exp\left[-\left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_B}\right)^{1.3}\right] \quad (2.11)$$

em que:

q – Caudal de galgamento, em m³/s/m;

H_{m0} – Altura de onda significativa em frente à estrutura, calculada com o momento de ordem zero do espectro, em m;

γ_f – Fator de redução devido ao atrito do talude da estrutura;

γ_B – Fator de redução devido ao efeito de declividade das ondas incidentes.

No entanto, para estruturas de proteção marginal localizadas junto ou acima da linha de costa as fórmulas aí propostas não são aplicáveis, pois a agitação considerar é a que ocorre no pé da estrutura, que neste caso se encontra emersa.

2.4. Modelo numérico IH-2VOF

2.4.1. Descrição do modelo

O modelo numérico IH-2VOF (Losada *et al.* 2008; Lara *et al.*, 2011), desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria, é um modelo numérico bidimensional (2D) utilizado extensivamente na análise do estudo do galgamento em estruturas de taludes de enrocamento. Este modelo numérico resolve as equações de Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) em valor médio, por meio do

método numérico das diferenças finitas. Este método consiste numa malha de diferenças finitas definida por nós e permite obter soluções aproximadas de equações diferenciais satisfeitas nos nós da malha de discretização (W5). A descrição detalhada deste modelo pode ser encontrada no respetivo manual (IH2VOF, 2012).

As equações de RANS apresentam uma complexidade que torna inviável a sua resolução por forma analítica, recorrendo-se então à implementação computacional das equações. A implementação computacional das equações de Navier-Stokes tem como objetivo a determinação do campo de velocidades, \mathbf{u} , e do campo de pressões, \mathbf{p} , num dado volume de controlo.

O modelo numérico impõe como condições iniciais no domínio total do modelo um escoamento médio com ausência de ondulação, ou seja, com velocidade nula e a pressão hidrostática. Relativamente à turbulência associada ao escoamento, o modelo $k - \varepsilon$ não deve ser inicialmente nulo, pois a geração de turbulência é proporcional à energia cinética, \mathbf{k} . Caso fosse considerado $k = 0$ como condição inicial, não haveria produção de energia turbulenta durante o decorrer da simulação, razão pela qual o modelo necessita de utilizar um valor de energia cinética inicial, designado na literatura anglo-saxónica por *seed* (equação 2.12). A outra componente essencial da energia turbulenta é o rácio de dissipação turbulenta, ε , apresentado na equação 2.13 (IH2VOF, 2012).

$$k = \frac{1}{2} u_t^2 = \frac{1}{2} (\delta c_i)^2 \quad (2.12)$$

$$\varepsilon = C_d \frac{k^2}{v_t} = C_d \frac{k^2}{\xi v} \quad (2.13)$$

em que:

c_i – é a dada pela celeridade da onda na zona de geração;

δ – constante de valor 0.025 (Lin, 1998);

ξ – constante de valor 0.1 (Lin, 1998).

No que se refere às condições de fronteira, o domínio do modelo IH-2VOF inclui fronteiras sólidas e de superfície livre. A fronteira sólida é regida por duas condições impostas ao escoamento, uma sem deslizamento e outra com deslizamento:

$$\begin{cases} \overline{u_n} = 0 ; \overline{u_\tau} = 0 \text{ (sem deslizamento)} \\ \overline{u_n} = 0 ; \frac{\partial \overline{u_\tau}}{\partial n} = 0 \text{ (com deslizamento)} \end{cases} \quad (2.14)$$

em que n e τ são as direções normal e paralela à fronteira, respetivamente.

Para além da fronteira sólida, é ainda essencial considerar a fronteira coincidente com o nível médio da superfície livre. O modelo utiliza a técnica VOF para capturar o movimento da superfície livre. O método VOF (*Volume of Fluids*), definido por Hirt e Nichols (1981), consiste não em rastrear a posição exata da superfície livre a cada instante, mas em delinear a sua posição através da identificação das mudanças de densidade nas células constituintes do modelo numérico. Este rastreamento é feito pela determinação do valor da função VOF, dado pelo parâmetro F :

$$F = \frac{\rho}{\rho_f} \quad (2.15)$$

em que:

$$\rho = \frac{\rho_f V_f}{V_f + V_a};$$

V_f – Volume do fluído contido na célula, em m^3 ;

V_a – Volume de ar contido na célula, em m^3 ;

ρ_f – Massa volúmica do fluído, em kg/m^3 .

Existem três tipos de células no modelo, as células do tipo E (*Empty*), do tipo I (*Interior*) e do tipo S (*Surface*), possíveis então de identificar através do fator F , como já mencionado:

$$\begin{cases} E \text{ (empty) quando } F = 0 \\ S \text{ (surface) quando } F > 0 \\ I \text{ (interior) quando } F = 1 \end{cases}$$

A geração de ondas no modelo pode realizar-se através de um batedor de ondas estático (respeitando a condição de fronteira de Dirichlet) ou um batedor de ondas dinâmico (pelo método das forças virtuais). As ondas geradas durante a simulação devem replicar o comportamento de ondas em contexto experimental ou nas zonas costeiras. A condição de fronteira de Dirichlet, essencial à utilização do batedor estático, é um dos métodos mais simples de implementar em modelos de geração de ondas,

necessitando apenas de duas variáveis para cada passo temporal. A primeira destas variáveis é o nível da superfície livre, sendo a segunda variável a velocidade (dividida nas suas componentes vertical e horizontal). Note-se que esta condição de fronteira também permite replicar o comportamento de batedores de modelo físico presentes em laboratórios, como, por exemplo, geradores do tipo pistão.

As fronteiras dedicadas à absorção das ondas incidentes têm uma importância significativa no modelo IH-2VOF, pois mitigam quaisquer efeitos de reflexão que possam surgir na superfície das estruturas costeiras ou praias a analisar que atinjam o batedor, e alterem as condições de agitação incidentes a modelar. No canal de ondas gerado pelo modelo existem duas formas de absorção: a absorção ativa, desenvolvida Schaffër e Klopman (2000) e a camada de esponja (ou *sponge layer*) desenvolvida por Israeli e Orszag (1981). A primeira destas metodologias identifica e “anula” as ondas refletidas que atingem a fronteira e geração das ondas, enquanto que a segunda introduz uma camada absorvente no local de geração das ondas, dissipando ondas com incidência oposta à da propagação (IH2VOF, 2012).

2.4.2. Discretização do domínio

Para a aplicação dos métodos numéricos na resolução de equações diferenciais parciais, é necessária a discretização do domínio físico em análise. O modelo IH-2VOF utiliza uma discretização de células exclusivamente retangulares. Todas as grandezas escalares (pressão), grandezas relativas à turbulência (k e ϵ) e a função VOF, são definidas no centro das células, enquanto as grandezas vetoriais, como o campo de velocidades, são estabelecidas nas faces de cada elemento da malha.

A geração da malha computacional que serve de base ao modelo IH-2VOF é realizada através de uma interface gráfica, GUI (*Graphical User Interface*) do programa CORAL (IH2VOF, 2012). Esta interface permite gerar os vários elementos da malha, e ainda definir obstáculos (quebra-mares, defesas aderentes, etc.) e meios porosos (mantos exteriores, camadas de filtro ou de núcleo). Após a definição das características geométricas revelantes do caso a estudar e da dimensão da malha ao longo do domínio por parte do utilizador, o programa gera os dados uma grelha computacional que é lido pelo modelo numérico (IH2VOF, 2012).

A interface do Coral é acedida por uma janela principal (apresentada na Figura 2.9), dividida segundo as suas funcionalidades em quatro zonas distintas.

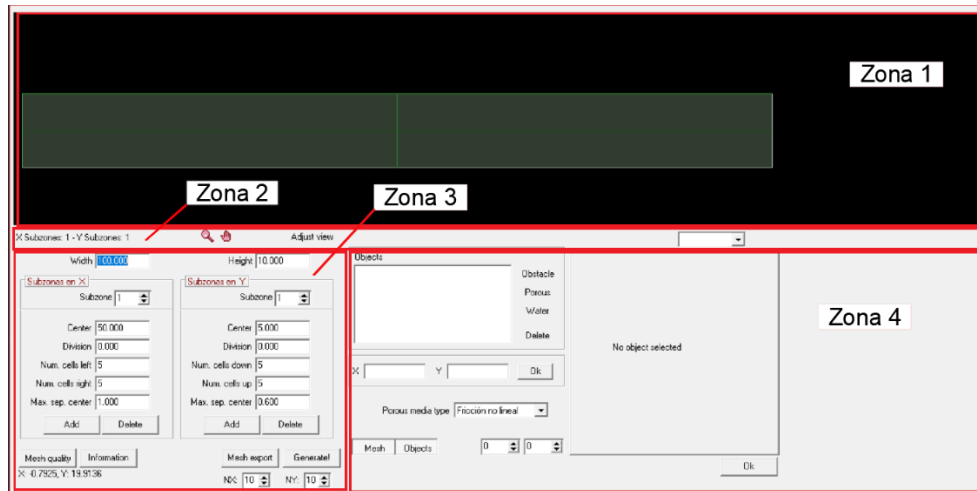


Figura 2.9 –Interface do programa CORAL.

O processo de geração da malha no CORAL começa pela definição das dimensões do domínio, neste caso a largura e a altura do canal. O segundo passo é a definição da geometria da estrutura a testar, representada por polígonos após especificar as coordenadas dos seus vértices. Elementos como a batimetria de fundo e elementos em betão armado podem ser definidos como obstáculos, sendo assim objetos detetados pelo programa pela sua ausência de porosidade. Elementos porosos são introduzidos na malha de forma semelhante aos obstáculos, mas é necessário definir as características necessárias à descrição de cada meio poroso, concretamente:

- Porosidade (n);
- Coeficiente de fricção linear (α);
- Coeficiente de fricção não-linear (β);
- Coeficiente de massa (C_A);
- Diâmetro de corte (D_{50}).

Por fim, introduzem-se, na secção apropriada, as coordenadas do nível de água do canal. É recomendado que se estenda esta área para fora dos limites do domínio definido, de modo a evitar o surgimento de problemas nas fronteiras.

A malha gerada no programa CORAL tem uma estrutura ortogonal, podendo ser constituída por células de dimensões constantes ou variáveis. Recomenda-se o uso de malhas com dimensões uniformes sempre que possível, pois o facto de o processo de homogeneização de volume para utilização do modelo RANS ser de primeira ordem pode dar origem a erros numéricos significativos devido à variação de

dimensão das células. No entanto, para casos de estudo em que se torna necessário reproduzir um domínio muito longo mas manter uma boa discretização das áreas de grande interesse, uma malha de dimensões variáveis permite reduzir o número total de células, reduzindo efetivamente o “esforço” de modelação a nível computacional.

A construção da malha computacional faz-se por um conjunto de malhas de menores dimensões designadas no CORAL por subzonas que se identificam pelas suas coordenadas no sistema xoy , com origem no canto superior esquerdo do domínio, sendo desta forma o eixo x positivo no sentido esquerda-direita e o eixo y positivo no sentido cima-baixo.

A ligação de todas as sub-zonas entre si, após definição do seu espaçamento separadamente, cria zonas na malha com espaçamento variável, em que as células diretamente adjacentes ao ponto de convergência apresentam o espaçamento mínimo permitido, que depois se expande quadraticamente a partir desse ponto (para ambas as direções, esquerda e direita ou para cima e baixo) até às células situadas nos limites da sub-zona, respeitando o número total de células imposto pelo utilizador em cada direcção da malha. O número de células imediatamente à esquerda e direita (ou acima e abaixo) do ponto de convergência não necessita de ser igual, mas deverá apresentar pelo menos uma células em cada um dos lados.

Quando duas ou mais subzonas são conectadas, não deverão existir disparidades significativas de espaçamento na zona de transição entre elas. Sendo Δ_x e Δ_y a dimensão respetiva das células segundo a direcção x ou y , algumas das regras que devem ser respeitadas quando se determina o correcto espaçamento em cada subzona são as seguintes:

- I. Devem evitar-se diferenças de espaçamento entre células adjacentes maiores que 10-20% (em ambas as direções);
- II. $1 < \frac{\Delta_x}{\Delta_y} < 5$;
- III. De modo a evitar o surgimento de rebentações “falsas” (*false breaking*), recomenda-se que o número de células por comprimento de onda seja suficiente para que o declive da onda no limite de rebentação possa ser representado, neste caso para $(H/L)_{\max} \approx \tan(23^\circ)$ temos :

$$\Delta_x < 2.5 \Delta_y$$

- IV. Mudanças na dimensão de cada célula devem ser menores que 5%, de modo a prevenir o surgimento de variações de tamanho muito bruscas entre células:

$$\begin{cases} \Delta^2_x < 0.05 \\ \Delta^2_y < 0.05 \end{cases}$$

- V. Recomenda-se que o número de células por comprimento de onda (direcção horizontal - \mathbf{n}_x) seja superior a 100 no caso de ondas com rebentação e entre 70 e 100 caso contrário. Na direcção vertical, o número de células (\mathbf{n}_y) deverá manter-se entre os 7 e os 10:

$$\begin{cases} 70 < nx < 100 \\ 7 < ny < 10 \end{cases}$$

Após a geração da malha ortogonal, é necessário verificar a sua qualidade, com recurso à opção *Mesh Quality* do CORAL. Acede-se então à janela da Figura 2.10, na qual o gráfico superior permite observar o tamanho das células ao longo do eixo x em toda a extensão do domínio (identificada por uma linha negra espessa) e da derivada desse valor, representativa da variação do tamanho das células em diferentes zona do domínio (identificada por uma linha verde fina). O eixo horizontal é referente à coordenada em x e o eixo vertical referente ao tamanho da célula, tal como da sua derivada correspondente. O gráfico imediatamente abaixo representa o que se acaba de descrever para o eixo y . Caso a curva das derivadas atinja em algum ponto um valor absoluto de 0.05, ou seja, caso não seja cumprida a regra IV do espaçamento da malha já descrita anteriormente, as linhas de representação da dimensão das células alteram a sua cor de preto para vermelho nesta secção.

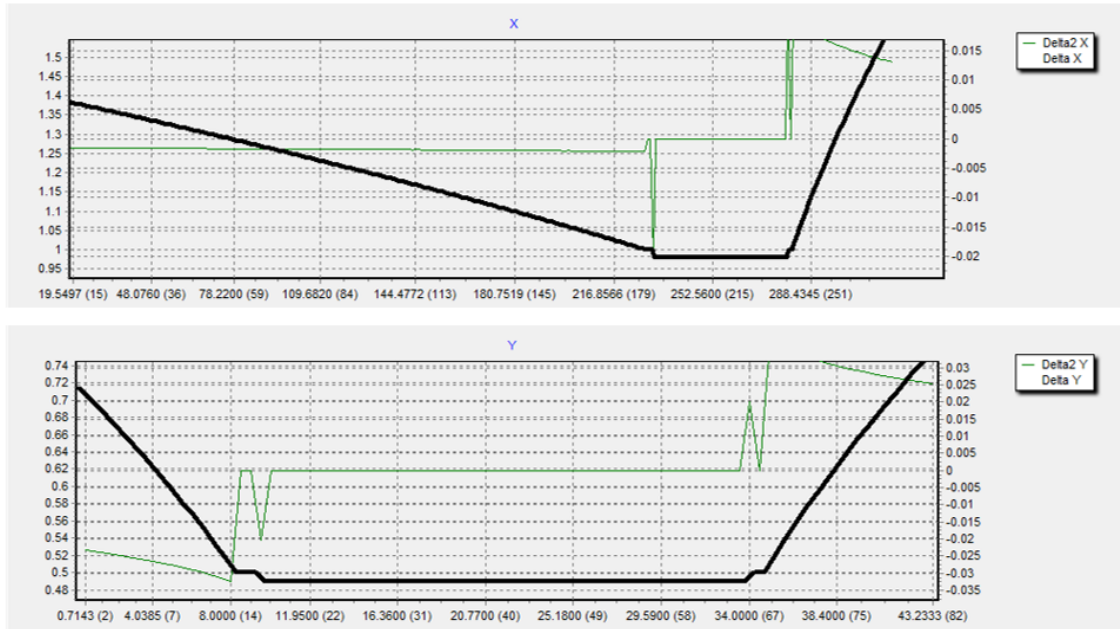


Figura 2.10 – Janela de verificação da *Mesh Quality* do IH2-VOF: eixo do xx (cima), eixo dos yy (baixo).

Caso a malha gerada apresente boa qualidade, sem zonas vermelhas, e que cumpra as restantes regras definidas para o seu correto espaçamento, exporta-se o ficheiro da malha no formato *.mes, para ser lido pelo modelo IH-2VOF (IH2VOF, 2012).

2.4.3. Dados de entrada do modelo

Uma vez definida a malha de discretização do domínio com as estruturas a simular, O caso de estudo a simular é definido na interface do modelo (IH-2VOF GUI), Figura 2.11, onde após a criação de um novo caso é aberto o menu de pré-processamento numa nova janela, onde se procede ao preenchimento dos dados de entrada para pré-processamento. Os dados de entrada do modelo são introduzidos através da interface de pré-processamento do modelo. Existem três elementos a definir no menu de pré-processamento para que se proceda à simulação de um caso: a malha, as condições de agitação incidentes a simular e o respetivo batedor, as condições de fronteira e os parâmetros da simulação (ficheiro de dados - *input* - do modelo).

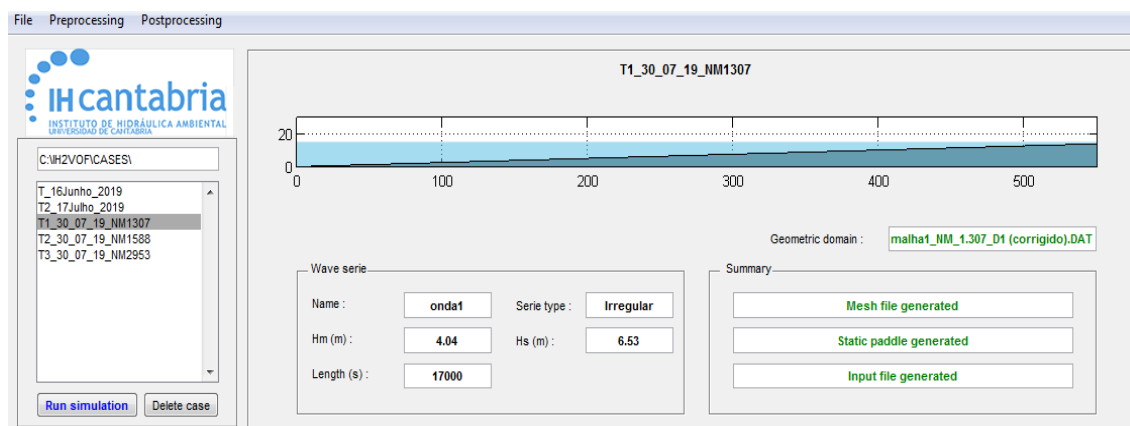


Figura 2.11 – Menu de interface (GUI) do IH-2VOF.

O primeiro elemento corresponde à geração da malha diretamente no programa CORAL ou à sua importação, caso a malha já tenha sido gerada previamente. A geração correta da malha pode ser confirmada pela exibição de uma pequena figura na zona superior direita do menu.

O segundo elemento corresponde ao estabelecimento das condições de agitação a simular, gerando-se uma série com ondas do tipo regular, irregular ou solitária. Cada uma destas condições está associada a uma altura, período, duração e frequência do sinal gerado. Enquanto as ondas solitárias são geradas segundo a teoria de Boussinesq ou Grimshaw, as ondas regulares podem ser geradas pela teoria linear, de Stokes II ou V e a Cnoidal. As condições para ondas irregulares, por outro lado, têm em conta um conjunto de parâmetros espectrais. De notar que a série temporal de agitação pode ser também importada ou reconstruída a partir de um registo de superfície livre, caso tenha sido previamente gerado. A geração da

série de ondas é sucedida pela geração do batedor, que poderá ser estático ou dinâmico, como referido anteriormente.

O pré-processamento do caso termina com a definição dos parâmetros de simulação, nomeadamente a duração da simulação (geralmente com igual duração ao comprimento da série de ondas) e o seu passo temporal (ou *timestep*) inicial, que apresenta um valor padrão de 0.005 segundos. Esta secção do menu inclui opções adicionais como a possibilidade de absorção das ondas na fronteira esquerda ou direita ou a inclusão de um modelo de turbulência. A interface do modelo IH-2VOF permite ainda seleccionar os resultados a armazenar: os valores de VOF, velocidade, pressão e turbulência (quando ativa) de todo o domínio após a simulação. Permite ainda definir a posição de sondas numéricas. Caso o utilizador pretenda obter os valores de espraimento (*run-up*) no término da simulação, deverá definir numa janela separada qual a zona onde se deve proceder ao cálculo deste parâmetro, assim como o cálculo de pressão em torno de estruturas impermeáveis, como muros verticais e o cálculo do galgamento (IH2VOF, 2012).

Na Figura 2.12 observa-se o layout de um menu de pré-processamento de um caso pronto a ser simulado.

Figura 2.12 - Menu de pré-processamento do IH-2VOF.

2.4.4. Simulação e pós-processamento

Reunidas as condições de pré-processamento, inicia-se a simulação do caso em estudo e no seu término tornam-se disponíveis os resultados do modelo e as opções de pós-processamento (IH2VOF, 2012).

O menu de pós-processamento torna-se acessível após o fim da corrida da simulação, disponibilizando as resultantes séries de espectros de ondas, valores de espraçamento, galgamento e campos de pressão para análise segundo as definições estabelecidas no pré-processamento.

As séries temporais de superfície livre estão associadas às correspondentes sondas de superfície livre definidas previamente na interface de pré-processamento. Também é possível proceder ao cálculo do espectro de superfície livre, com indicação do intervalo de tempo e o número de componentes a determinar.

A análise do espraçamento na área especificada previamente no menu de pré-processamento é apresentada em 4 gráficos distintos com:

- série temporal do espraçamento, em metros;
- histograma do número de eventos de espraçamento;
- função de distribuição cumulativa associada aos eventos de espraçamento ocorridos (probabilidade associada a cada valor obtido);
- linhas de delimitação constituídas pelos valores máximo, médio e mínimo da superfície livre em cada posição (horizontal) da geometria da estrutura simulada.

Apresentam-se ainda os valores de espraçamento médio, máximo e excedido em 2%.

Ao contrário do procedimento de análise do espraçamento, a ferramenta de análise do galgamento é acedida pelo menu de pós-processamento do modelo IH-2VOF, que exhibe uma janela de resultados com quatro gráficos diferentes (descritos por ordem descendente) com:

- volume acumulado de galgamento, em metros cúbicos por metro, ao longo da linha temporal decorrida;
- caudal instantâneo de galgamento, em metros cúbicos por metro;
- espessura da “lâmina” de água formada pelo galgamento, em metros;
- velocidade média do galgamento, em metros por segundo.

Existe também uma opção no menu de pós-processamento do modelo que permite produzir uma análise do campo de pressões no domínio, de forma homóloga à análise do espraçamento.

A última opção deste menu é a função *drawfast*, que permite a representação de várias variáveis ao longo de um intervalo de tempo desejado, com um passo temporal definido. As variáveis que podem ser representadas graficamente incluem a função VOF, as velocidades horizontal e vertical, a pressão e a intensidade da turbulência (IH2VOF, 2012).

Capítulo 3 - Caso de Estudo

3.1. Considerações gerais

O concelho da Figueira da Foz, parte integrante do distrito de Coimbra, está subdividido em 14 freguesias, cobrindo uma área de cerca de 379 km² e uma densidade populacional de 155.3 habitantes por km², segundo dados de 2018 (W7). Este município é delimitado a norte por Cantanhede, a leste por Montemor-o-Velho e Soure, a sul por Pombal e finalmente a oeste pelo Oceano Atlântico. A sua linha costeira, entre os concelhos de Pombal e Cantanhede, estende-se por cerca de 55 dos 943 km que compõem totalidade da costa portuguesa continental.

O Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental - COSMO (W8), iniciado em julho de 2018 pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), realizou um estudo preliminar para identificação dos troços da linha de costa que sofreram de forma mais gravosa os efeitos da erosão (Figura 3.1). Neste estudo observou-se que a linha de costa entre Cova-Gala e Lavos (imediatamente a sul), no período entre 2010 e 2018, apresenta uma tendência evolutiva para o recuo agravado da sua linha de costa, concluindo-se que neste período as taxas de erosão, mais de 3 vezes superiores às verificadas entre 1958 e 2010, conduziram a recuos máximos de aproximadamente 50 m no litoral.



Figura 3.1 - Troços do litoral português em situação de erosão costeira gravosa, no período entre 1958 e 2010. (W8)

O galgamento de estruturas em proteção marginal tem vindo a agravar o défice sedimentar ao nível das zonas costeiras nos últimos anos, devido a fatores de risco como a presença de climas de agitação extremamente energéticos e a fenómenos de deriva litoral significativa, provocando um aumento do número de eventos de inundação nestas zonas.

O caso de estudo do presente trabalho encontra-se situado na praia da Cova-Gala, concelho da Figueira da Foz, cujo areal se estende por aproximadamente 2 km, separado em três zonas por meio de quatro esporões equidistantes. Mais concretamente, estuda-se nesta dissertação o galgamento da defesa aderente edificada no limite do areal de Cova-Gala, cuja localização geográfica pode ser observada na Figura 3.2, entre o segundo e o terceiro destes esporões (identificados no sentido N-S).

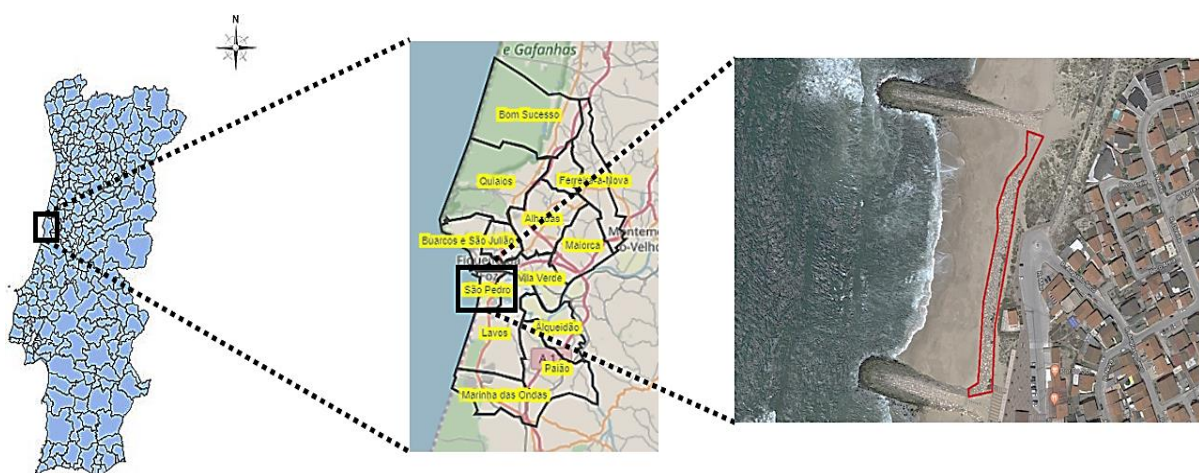


Figura 3.2 – Localização geográfica da linha costeira na praia da Cova-Gala. (W9; W10; adaptado de *Google Earth*, 11/08/19)

Tratando-se de uma área costeira com diversos problemas de erosão, esta frente marítima tem sido alvo de um conjunto significativo de intervenções e campanhas de recuperação ao longo dos anos, na maioria dos casos em consequência dos danos provocados após condições de agitação marítima especialmente gravosas. Destacam-se as medidas de segurança urgentes realizadas em 1975, através da colocação de um conjunto de defesas longitudinais aderentes ao longo da frente marítima da Cova-Gala, em consequência da ação dos invernos marítimos de 1971 e 1972, em que as edificações situadas na duna frontal do cordão litoral a sul da embocadura do rio Mondego foram expostas a uma situação de risco pela sua proximidade com a linha de costa, que sofreu uma erosão significativa. Também a ocorrência de temporais adversos em 1978 nesta zona levaram à adoção de novas medidas de segurança, nomeadamente o reforço do prisma de enrocamento das defesas longitudinais em 1 metro, complementadas por um campo de cinco esporões entre 1978 e 1979 (Oliveira & Brito, 2015).

3.2. Estrutura de proteção marginal

A estrutura de proteção marginal em estudo (Figura 3.3) é uma defesa longitudinal aderente cuja função primária é a mitigação dos efeitos do galgamento e consequente proteção das pessoas e edificações na sua retaguarda.



Figura 3.3 - Estrutura de proteção marginal em estudo (praia da Gala Cova, Figueira da Foz).

A estrutura é composta por um manto exterior com uma camada de blocos de enrocamento, com 5 tonf de peso e diâmetro nominal de 1.24 m, separado do núcleo de areia por uma camada de filtro com 0.5 tonf e diâmetro nominal de 0.58 m. O seu coroamento situa-se a uma cota média de 10.2 m em relação ao zero hidrográfico (Z.H.) e apresenta uma largura de 8.7 m, coincidente no limite com um murete de dimensões 0.5 x 0.5 [m].

Para o presente caso de estudo, utilizou-se como perfil representativo da zona submersa em frente à praia e da face de praia o que se apresenta na Figura 3.4, resultante de levantamentos realizados em diferentes anos nesta zona (Oliveira e Brito 2015).

Assim, a configuração do perfil transversal da estrutura e fundo pode ser dividida em três zonas de declive distinto:

- o perfil submerso, com declive de 77:1 e início à cota -37 m (Z.H.);
- a face de praia, com declive de 25:1 e início à cota 0 m (Z.H.);
- a estrutura, com declive de 2:1 e início à cota 4 m (Z.H.).

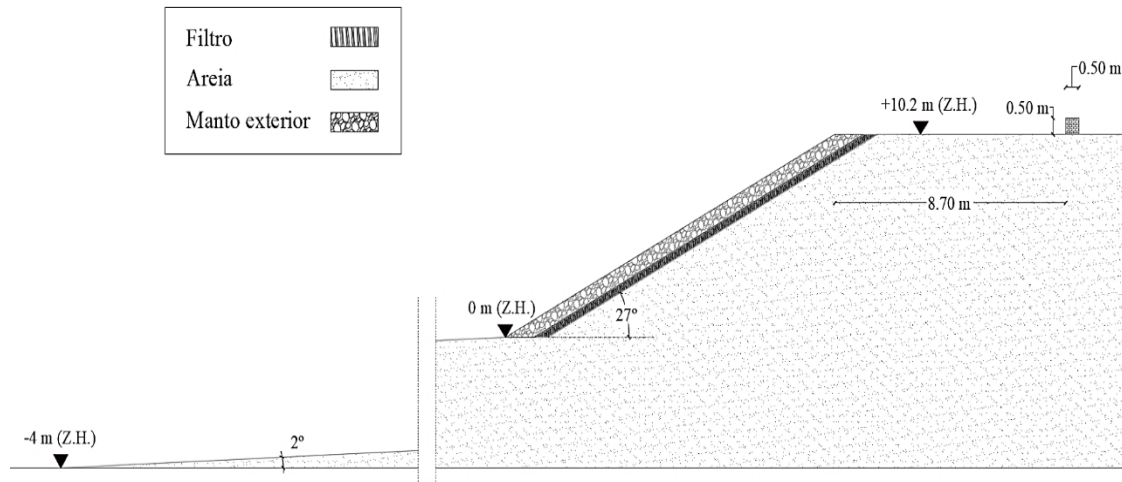


Figura 3.4 – Secção transversal da defesa aderente da praia da Cova-Gala.

3.3. Agitação marítima

Os dados de previsão da agitação marítima foram obtidos por Dodet, Bertin, and Taborda (2010), pela aplicação de um modelo de ondas espectral no ponto de coordenadas [10.0°W;40.0°N] (Figura 3.5) validado pelo cruzamento de dados registados em boias ondógrafo. Os dados correspondem a valores de altura significativa, período de pico e direção média de incidência, **Dir**, da onda para um período de 58 anos (entre 1952 e 2010), com um passo temporal de 6 h. Estes dados correspondem a um conjunto de 86200 eventos de agitação marítima, obtidos a uma profundidade de -14 m (Z.H.).

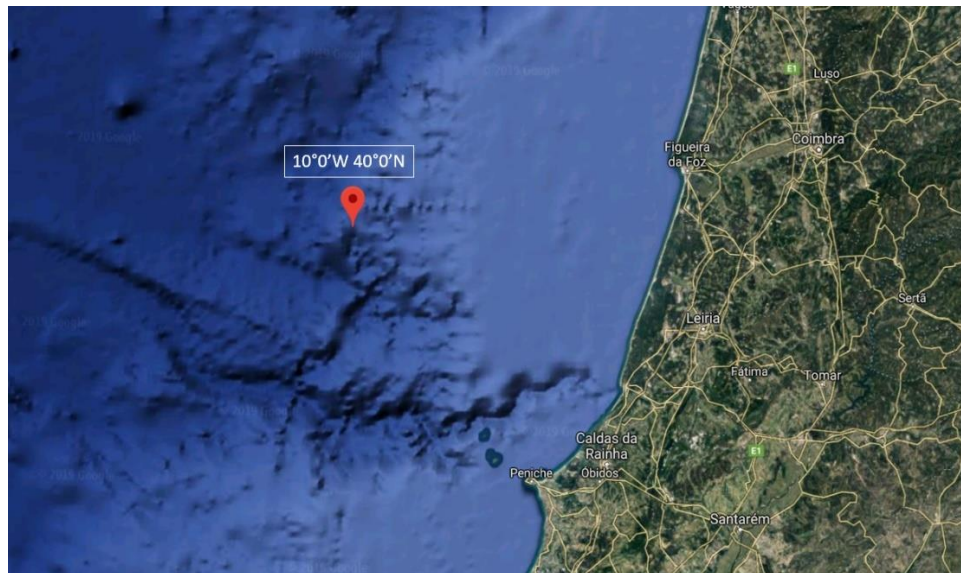


Figura 3.5 - Ponto de coordenadas dos dados de agitação usados neste estudo (a uma profundidade de -14 m, adaptado de *Google Earth*, 25/08/19)

Tendo em conta que a direção aproximada da perpendicular à estrutura de proteção marginal em estudo é de 289.6 °N, Pires (2018) verificou que em 95% dos eventos de agitação acima referidos a direção estava compreendida no intervalo [270;337.5] °N, concentrados maioritariamente entre 280 e 300 [°N], isto é, com apenas $\pm 10\%$ em relação à direção perpendicular à estrutura.

3.4. Nível do Mar

Os dados relativos à variação do nível do mar considerados neste trabalho foram obtidos por Fortunato *et. al* (2014) e correspondem a dados do ponto de coordenadas [40°9'N;8°'W], validados por comparação com previsões de nível de maré obtidas na plataforma *online* do Instituto Hidrográfico (IH), apresentando erros quadráticos médios entre 0.02 - 0.05 [m] e máximos na ordem dos 0.15 m.

Os dados correspondem a uma série temporal tri-horária de níveis do mar que inclui não só o efeito da maré astronómica, mas igualmente da maré meteorológica, para o período compreendido entre 1952 e 2010.

Capítulo 4 - Modelação Numérica do caso de estudo

Para calcular de forma mais precisa possível o galgamento sobre a estrutura de defesa aderente de Cova-Gala, é possível utilizar a modelação numérica. Assim, a fim de verificar a capacidade do modelo numérico IH-2VOF em calcular o galgamento na defesa longitudinal aderente em estudo, apresenta-se neste capítulo os testes realizados e os resultados obtidos. Analisaram-se três casos de agitação marítima, com o principal objetivo de verificar a capacidade de o modelo obter resultados comparáveis com os obtidos através da fórmula utilizada nos cálculos, na fase de ante-projeto de uma estrutura deste tipo, que para este caso é a fórmula de Mase *et al.* modificada por Masatoshi *et al.* Assim, neste capítulo faz-se a descrição dos dados do modelo (agitação, nível de mar e estrutura), da malha com que se discretiza o domínio e dos resultados obtidos com o modelo e das dificuldades encontradas.

4.1. Agitação e nível de mar

O processo de escolha dos casos de agitação marítima a modelar com o modelo IH-2VOF inicia-se pela identificação dos dados descritos em 3.3 com direção de propagação das ondas perpendicular próxima da direção normal à estrutura, ou seja, um ângulo de ataque da onda próximo de zero ($\beta \approx 0$), já que o modelo é bi-dimensional. Isto significa que os casos selecionados devem apresentar uma direção de incidência da agitação próxima de 289.6° , que neste caso se admitindo uma diferença de $\pm 0.05^\circ$.

Considerando os 86200 instantes de agitação marítima de *hindcast* descritos na secção 3.3, obtidos com condições de mar variáveis e na batimétrica de -14 m (Z.H.), para os quais não se dispõe de dados de galgamento na estrutura em estudo, foram detetados 202 casos com β dentro destes limites. Dentro destes casos escolheram-se as condições de agitação (altura de onda significativa e período de pico) que permitissem obter uma gama representativa de caudais de galgamento. Assim, pretendia-se que estes casos compreendessem os vários níveis de caudais admissível, já descritos no Quadro 2.1 da secção 2.2.:

- **q = 0.01** (l/s/m), caudal máximo admissível para a circulação de veículos;
- **q = 0.1** (l/s/m), caudal máximo admissível para a circulação de pessoas;
- **q = 0.4** (l/s/m), caudal máximo admissível para a segurança de propriedades existentes num raio de 5-10 metros da estrutura;

- **q = 200** (l/s/m), caudal máximo admissível para a segurança de estruturas de proteção.

Assim, efetuaram-se cálculos com as fórmulas semi-empíricas de Mase *et al.* e do manual EuroTop (ver capítulo 5) e analisou-se a distribuição do caudal nos intervalos acima definidos para os 202 casos com $\beta \approx 0$, na Figura 4.1 e no Quadro 4.1.

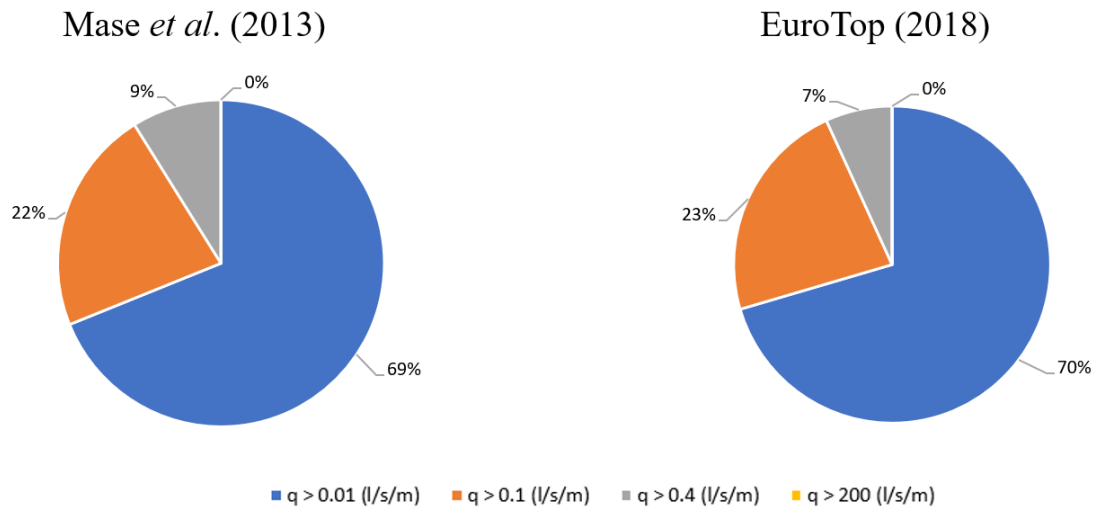


Figura 4.1 - Distribuição de casos de agitação marítima com β próximo de zero, para os intervalos considerados e utilizando as fórmulas de Mase *et al.* e EuroTop.

Quadro 4.1 – Número de casos de agitação marítima com β próximo de zero, em cada intervalo considerado.

q (l/s/m)	Mase <i>et al.</i> (2013)	EuroTop (2018)
[0.01;0.1]	31	31
[0.1;0.4]	10	10
[0.4;200]	4	3
> 200	0	0

Como se pode observar, em nenhum dos 202 casos de agitação analisados se obtém um caudal médio de galgamento superior a 200 l/s/m, com a aplicação destas fórmulas. Assim, foi selecionado, por cada uma das restantes gamas de caudal de galgamento em análise, um caso de agitação marítima a modelar com o modelo IH-2VOF. Para tal, foram ordenados os caudais obtidos em cada gama por ordem crescente, priorizando-se os casos não associados a caudais extremos (máximos ou mínimos) e que não possuam período de pico, T_p , ou altura de onda significativa, H_{m0} , e nível do mar, NM, muito díspares da média dos valores dessa gama. Selecionaram-se então, para a simulação, os casos de agitação apresentados no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Casos de agitação selecionados para modelação em IH-2VOF.

Caso	q (l/s/m)	H_{m0} (m)	T_p (s)	NM (m)	L (m)
1	]0.01;0.1]	6.47	17.08	1.307	198.92
2	]0.1;0.4]	7.94	17.68	1.588	206.14
3	]0.4;200]	8.67	19.49	2.953	227.54

O comprimento de onda, **L**, foi obtido pela equação 4.1:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} * \tanh\left(\frac{4\pi^2}{T^2} * \frac{h}{g}\right) \quad (4.1)$$

4.2. Discretização do domínio

O primeiro passo necessário para a modelação do galgamento na defesa aderente é a geração das malhas ortogonais de cada um dos casos de agitação e nível de mar a simular. Inicialmente foi considerado um domínio que cobrisse transversalmente toda a extensão do perfil submerso, face de praia, talude e coroamento da defesa longitudinal. No entanto, observou-se que a modelação deste domínio na sua totalidade se torna inviável, pois a utilização uma malha com precisão suficientemente elevada para reproduzir adequadamente o caudal galgado implicaria um esforço computacional significativo e um tempo de processamento muito longo associado a esse processamento (na ordem dos meses de cálculo).

De forma a contornar esta dificuldade, foi verificada a possibilidade de separar o domínio inicialmente considerado em dois domínios, designados de D1 e D2, esquematicamente representados na Figura 4.2. Assim, após a execução do modelo no domínio D1, obtém-se a série temporal da agitação num ponto que passa a ser a agitação incidente do domínio D2. Esta técnica permite reduzir o tempo de processamento do modelo. A precisão dos resultados deve, no entanto, ser aferida.

Para os casos em estudo nesta dissertação, o domínio D1 apresenta um comprimento de 550.2 m e uma altura de 30.33 m, com uma geometria de fundo simples e batimetria aproximadamente constante (com o baixo declive do perfil submerso). Nesta zona apenas ocorre a propagação das ondas, não sendo necessário um refinamento significativo da malha. O segundo domínio, D2, inicia-se a 30.20 m do final de D1, apresentando 730 m de comprimento e 30.33 m de altura, e caracteriza-se por ter uma geometria mais complexa e variações batimétricas

acentuadas, contendo a defesa longitudinal aderente e a face de praia, e apresentando um maior refinamento na zona do coroamento da estrutura, onde se mede o galgamento.

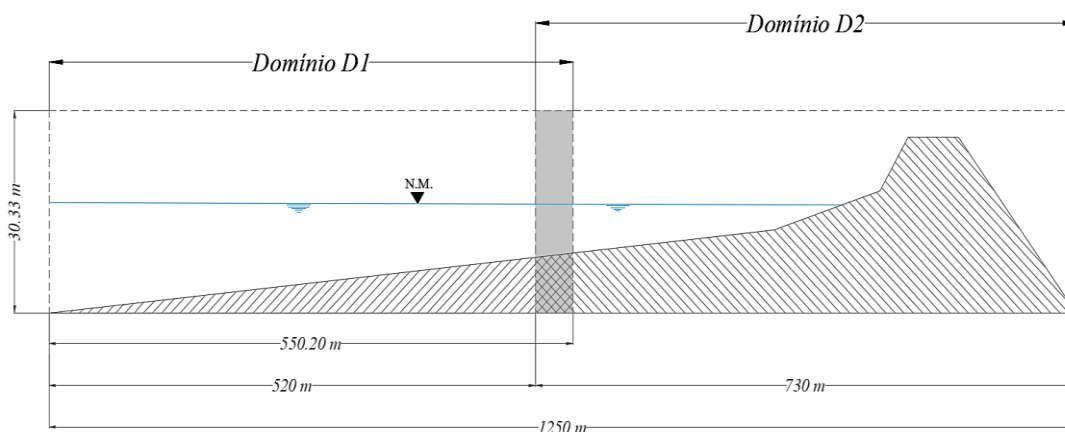


Figura 4.2 - Esquema da divisão do domínio geral da malha ortogonal em estudo.

A continuidade entre domínios é conseguida pela função de reconstrução da série temporal da agitação média no domínio D1, e utilizada como agitação incidente do domínio D2, já mencionada previamente. No entanto as velocidades na fronteira de entrada do domínio D2, quer na horizontal quer na vertical, são calculadas diretamente pelo modelo quando faz a geração das ondas.

4.2.1. Definição da geometria do perfil

A geometria do caso de estudo é introduzida definindo, no CORAL, os objetos de que se compõe a estrutura, especificando a sua designação, tipo e, no caso de acoplamento de domínios, em que domínio estão presentes. Foi adicionado ainda um obstáculo fictício na zona limite vertical do domínio, acima do manto exterior e do coroamento da estrutura, com o intuito de impedir que, durante a simulação escapem partículas, geradas na rebentação, para fora do domínio da malha, que impediriam a execução da corrida. Outra solução para resolver este problema seria aumentar o domínio na vertical, o que aumentaria de forma importante o tempo de cálculo do modelo sem melhorar nos resultados.

Em seguida, é necessário definir os diferentes mantos da defesa aderente em estudo e a areia que compõe a face de praia, explicitando as características necessárias à descrição de cada meio poroso, tal como apresentado em 2.4.2. Os valores utilizados na modelação estão apresentados no Quadro 4.3.

Os valores da porosidade, tal como dos coeficientes empíricos de fricção linear e não linear, foram retirados da bibliografia, García (2007), e o coeficiente de massa adicionada, de

0.34, foi o recomendado por Allsop *et al.* (2008). O valor de D_{50} foi calculado, para o manto exterior e filtro, com base no peso dos blocos do manto e a da areia, através de medições feitas na zona.

Quadro 4.3 - Características dos meios porosos da defesa longitudinal e da face de praia em estudo.

	Areia	Filtro	Manto exterior
n	0.4	0.35	0.4
α	3300	200	1000
β	0	1.1	0.7
C_A	0.34	0.34	0.34
D_{50} [m]	0.0003	0.6	1.2

4.2.2. Características da malha ortogonal

A discretização do domínio pode ser definida independentemente da geometria do perfil que lhe está associado. No entanto, de modo a garantir um espaçamento uniforme na subzona de interesse para a modelação, neste caso na secção do perfil com maior probabilidade de ocorrerem eventos de espraçamento e galgamento, esta subzona foi discretizada com os espaçamentos mais finos, tendo o cuidado de que os limites das subzonas verticais coincidam com a cota do nível de mar (NM) do caso de agitação a simular e com a cota de coroamento da defesa longitudinal aderente, de modo a que estes fiquem corretamente definidos aquando da discretização do domínio.

Esta particularidade torna inviável a adoção de uma mesma malha para a modelação dos três casos de galgamento em análise, pois cada evento apresenta um NM diferente. Desta forma, conclui-se que o espaçamento na direção vertical das células vai ser o fator condicionante no dimensionamento das subzonas da malha, assim como o tamanho de malha mínima a utilizar, para ter uma boa definição do galgamento. Assim, refinaram-se as malhas de modo a que as subzonas que englobam a defesa aderente apresentem um espaçamento de $\Delta = 0.17$ m nas malhas 1 e 2, e um espaçamento de $\Delta = 0.255$ m na malha 3, em ambas as direções do referencial.

Os domínios D1 e D2 da malha 1, associada ao caso de agitação com $NM = 1.307$ m, $H_{m0} = 6.47$ m e $T_p = 17.08$ s, apresentam a disposição das suas células esquematizadas nas Figura 4.3 e Figura 4.4, respetivamente. O domínio D1 é composto, na direção x, por uma subzona, SX1, de 1310 células, e na direção y por 146 células, distribuídas por quatro subzonas, SY1 a SY4. O número de células deste domínio totaliza 191406 células e as suas características apresentam-se

no Quadro 4.4, no qual Δ_{\max} e Δ_{\min} representam a dimensão máxima e mínima da célula na respetiva direção.

Quadro 4.4 - Características das subzonas da malha 1, Domínio D1.

Direção	X	Y			
Subzona	SX1	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	550.2	6.12	8.90	0.34	14.97
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.17	0.172	0.172	0.375
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.42	0.17	0.17	0.172	0.172
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	5	5	5	2
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1310	36	52	2	87

O número mínimo de células por unidade de comprimento permite determinar o nº mínimo de células na extensão de cada subzona da malha, fator que permite identificar a precisão com que a malha descreve o comprimento ou a altura das ondas simuladas no modelo.

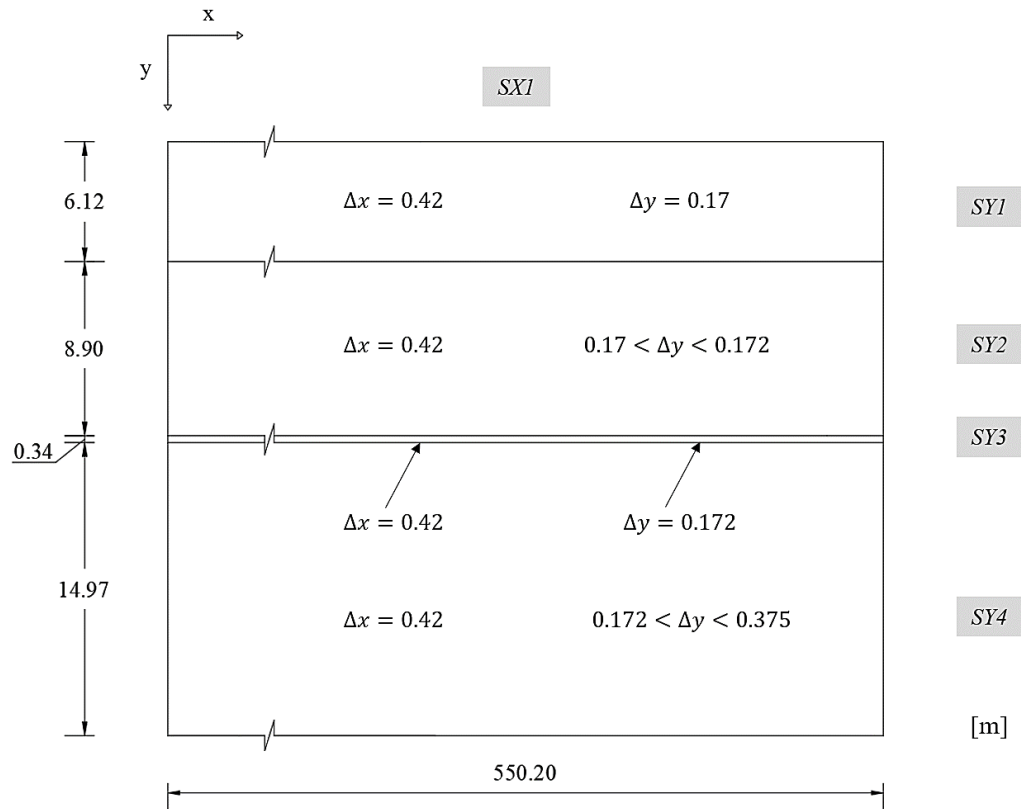


Figura 4.3 - Discretização da malha 1, domínio D1.

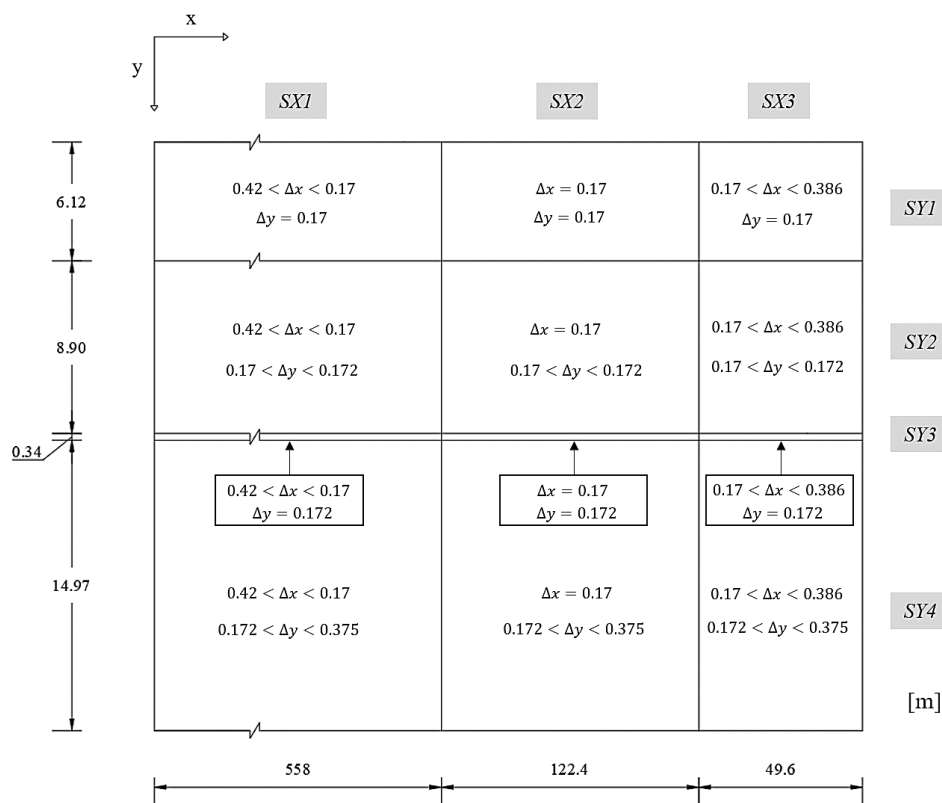


Figura 4.4 - Discretização da malha 1, domínio D2.

O domínio D2 da malha 1 é constituído por 2719 células na direção x, distribuídas por 3 subzonas, SX1 a SX3, e 146 células na direção y, partilhando as mesmas subzonas que D1, nesta direção. A malha para este domínio apresenta, então, um total de 396974 células em toda a sua extensão, Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Características da subzonas da malha 1, Domínio D2.

Direção	X			Y			
Subzona	SX1	SX2	SX3	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	558	122.4	49.6	6.12	8.9	0.34	14.97
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.17	0.386	0.17	0.172	0.172	0.375
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.172	0.172
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	5	2	5	5	5	2
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1328	720	128	36	51	2	39

A malha 2, ajustada para as condição de agitação com $NM = 1.588$ m, $H_{m0} = 7.938$ m e $T_p = 17.683$ s, está esquematizada nas Figura 4.5 e Figura 4.6, para os domínios D1 e D2, respetivamente.

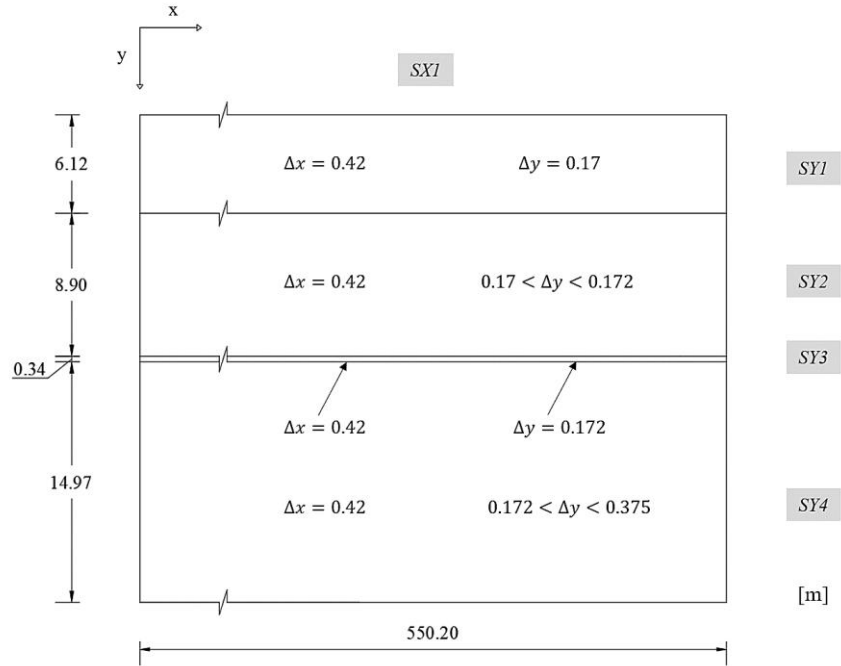


Figura 4.5 – Discretização da malha 2, domínio D1.

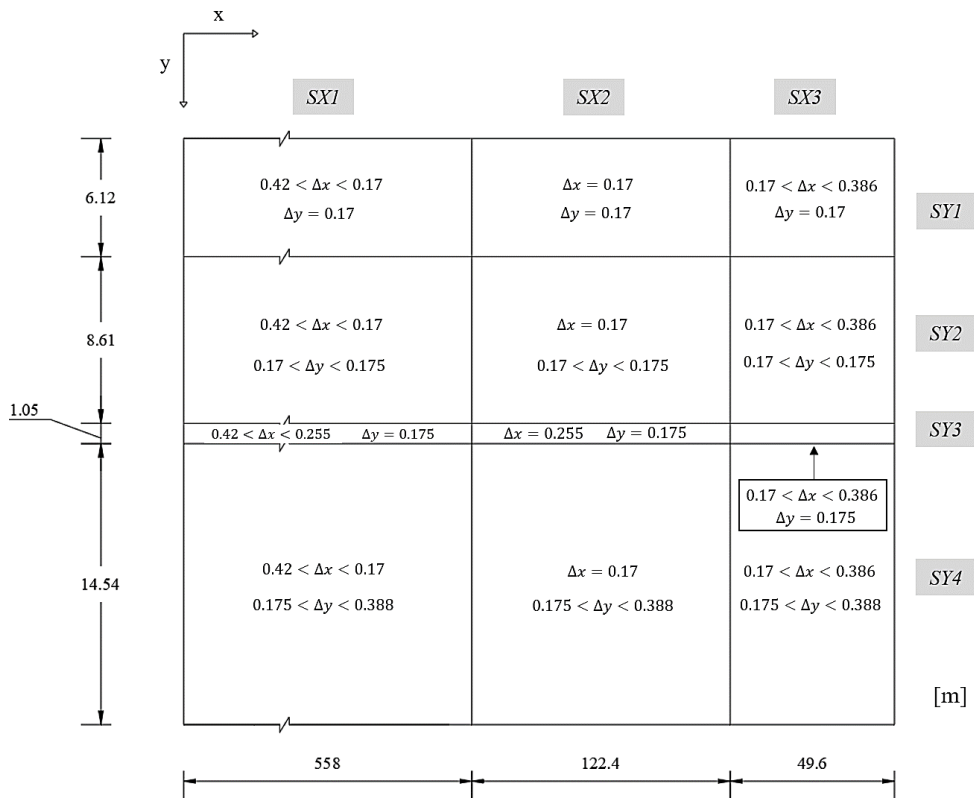


Figura 4.6 - Discretização da malha 2, domínio D2.

O domínio D1 desta malha é composto na direção x por uma subzona, SX1, de 1310 células, e na direção y por 145 células, distribuídas por quatro subzonas, SY1 a SY4, totalizando 190045 células. O domínio D2 contém as mesmas subzonas verticais que D1, mas apresenta 2719 células na direção x segundo três subzonas, SX1 a SX3, apresentando um total de 394255 células.

As características da malha 2 para os domínios D1 e D2, respetivamente, estão descritas nos Quadro 4.6 e Quadro 4.7.

Quadro 4.6 - Características da subzonas da malha 2, Domínio D1.

Direção	X	Y			
Subzona	SX1	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	550.2	6.12	8.62	1.05	14.54
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.17	0.175	0.175	0.388
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.42	0.17	0.17	0.175	0.175
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	5	5	5	2
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1310	36	49	6	37

Quadro 4.7 - Características da subzonas da malha 2, Domínio D2.

Direção	X			Y			
Subzona	SX1	SX2	SX3	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	558	122.4	49.6	6.12	8.62	1.05	14.54
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.17	0.386	0.17	0.175	0.175	0.388
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.175	0.175
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	5	2	5	5	5	2
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1328	720	128	36	49	6	37

Por fim, esquematizam-se as subzonas da malha 3, com $NM = 2.953$ m, $H_{m0} = 8.665$ m e $T_p = 19.487$ s, nos esquemas exibidos nas Figura 4.7 e Figura 4.8.

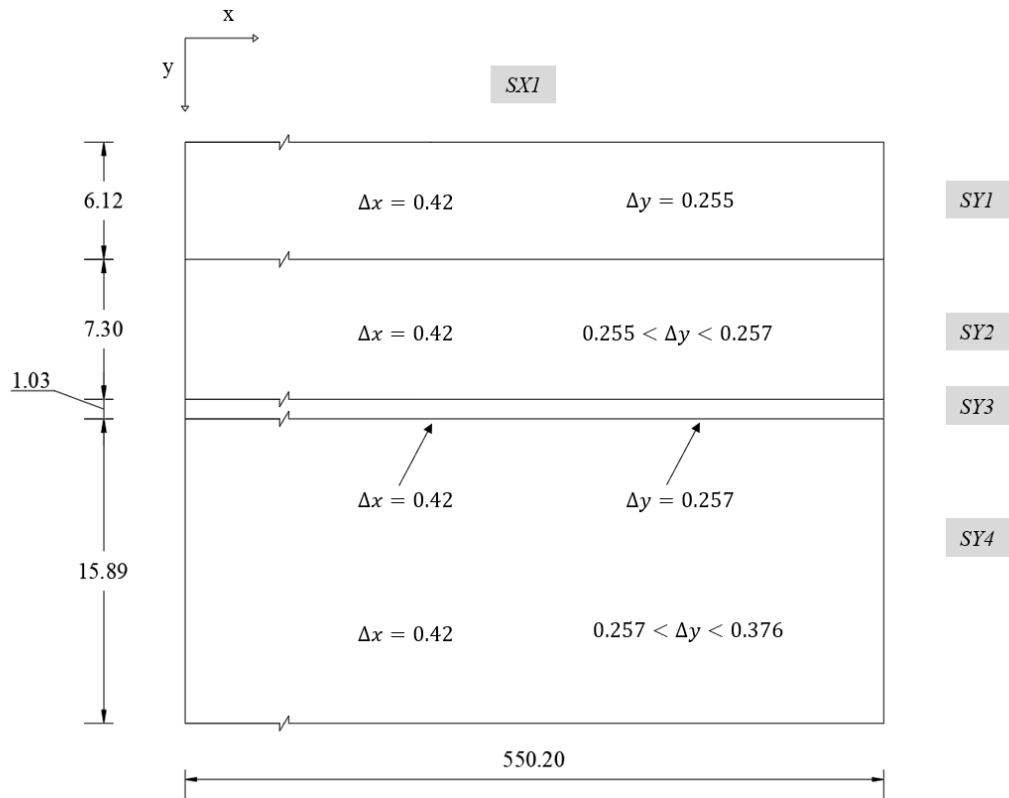


Figura 4.7 - Discretização da malha 3, domínio D1.

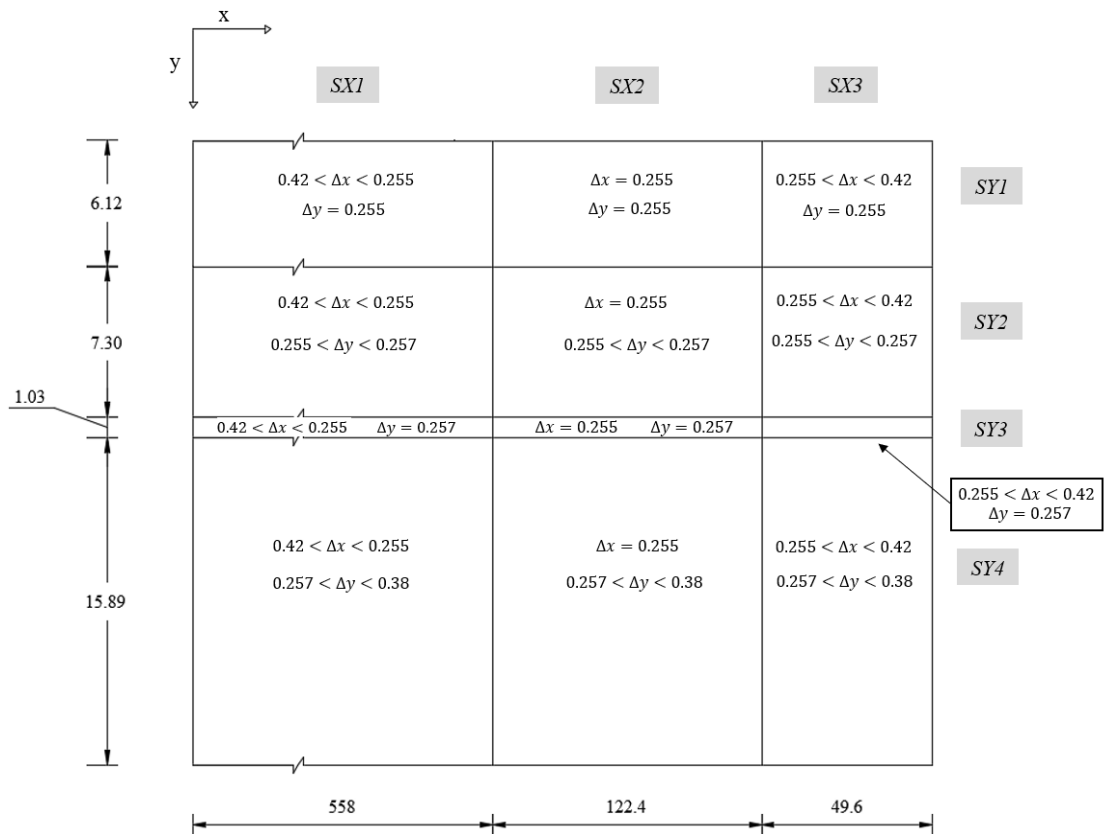


Figura 4.8 - Discretização da malha 3, domínio D2.

O domínio D1 desta malha é composto na direção x por uma subzona, SX1, de 1311 células, e na direção y por 108 células, distribuídas por quatro subzonas, SY1 a SY4, totalizando 141588 células. O domínio D2 contém as mesmas subzonas verticais que D1 e apresenta 2282 células na direção x três subzonas, SX1 a SX3, apresentando um total de 246456 células.

Os Quadro 4.8 e Quadro 4.9 especificam as características da malha 3, nos domínios D1 e D2, respetivamente.

Quadro 4.8 - Características da subzonas da malha 3, Domínio D1.

Direção	X	Y			
Subzona	SX1	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	550.2	6.12	7.30	1.03	15.89
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.255	0.257	0.257	0.376
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.42	0.255	0.255	0.257	0.257
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	4	4	4	3
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1310	24	28	4	42

Quadro 4.9 - Características da subzonas da malha 3, Domínio D2.

Direção	X			Y			
Subzona	SX1	SX2	SX3	SY1	SY2	SY3	SY4
Extensão da subzona [m]	558	122.4	49,6	6,12	7,30	1,03	15,89
$\Delta_{\max,x}$ ou $\Delta_{\max,y}$	0.42	0.255	0.42	0.255	0.257	0.257	0.38
$\Delta_{\min,x}$ ou $\Delta_{\min,y}$	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.257	0.257
Nº mínimo de células/ unidade de comprimento	2	4	2	4	4	4	3
Nº mínimo de células por comprimento/altura de onda	1329	480	118	24	28	4	42

Todas as malhas geradas no programa CORAL respeitam as condições impostas na secção 2.4.2, para os valores apresentados no Quadro 4.10, das relações entre o comprimento e a altura de onda e os espaçamentos de cada malha. Em particular é importante que o *aspect ratio* entre o $\Delta_{\max,x}$ e o $\Delta_{\min,y}$ se mantenha abaixo de 2.5, como já mencionado, de modo a evitar ocorrências de “falsas” rebentações caso a malha se torne demasiado retangular.

Quadro 4.10 - Valores de verificação dos critérios de espaçamento, para as malhas 1, 2 e 3.

	Domínio	L / Lx	H / Δ _{max,y}	L / Δ _{max,x}	Δ _{max,x} / Δ _{min,y}
Malha 1	D1	0.36	17.25	473.62	2.47
	D2	0.27			
Malha 2	D1	0.37	20.46	490.81	
	D2	0.28			
Malha 3	D1	0.41	23.06	541.76	1.65
	D2	0.31	22.82		

Para além garantir que os valores acima indicados se mantêm abaixo dos respetivos valores limite impostos, deve-se ainda verificar, para cada uma das malhas, a sua qualidade na função *mesh quality* do CORAL.

4.3. Dados de entrada do modelo numérico

A definição das malhas dos três casos analisar é apenas uma das componentes de pré-processamento necessárias para a realização das simulações com o IH-2VOF. De modo a garantir a continuidade entre domínios, a série temporal de agitação, saída do domínio D1, deve corresponder aos dados de entrada da agitação do domínio D2.

Para tal, no domínio D1 foram colocadas 9 sondas numéricas, tal como se apresenta na Figura 4.9, onde se apresenta a posição de cada sonda em relação ao sistema de eixos, xoz, com origem no canto inferior esquerdo do domínio.

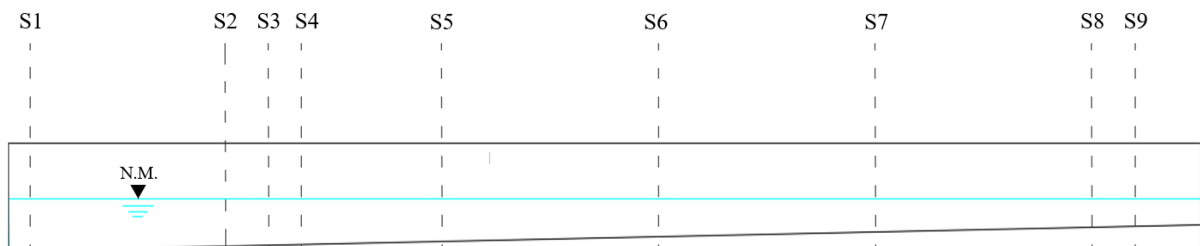


Figura 4.9 – Representação esquemática das sondas ao longo do domínio D1.

Todas as sondas foram numeradas por ordem crescente, de acordo com a sua distância à origem do referencial, nas posições especificadas no Quadro 4.11. Os dados de entrada do domínio D2 são obtidos na sonda S9, localizada a 520 m do início de D1, permitindo a reconstrução da série temporal de superfície livre e a sua incorporação posterior na agitação gerada pelo batedor para a simulação da agitação no segundo domínio, D2.

Quadro 4.11 - Posição das sondas do domínio D1.

Nº sonda	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Posição em relação a X0Z (m)	10	100	120	135	200	300	400	500	520

No segundo domínio colocou-se um total de 54 sondas, cuja posição esquemática no modelo numérico é especificada na Figura 4.10.

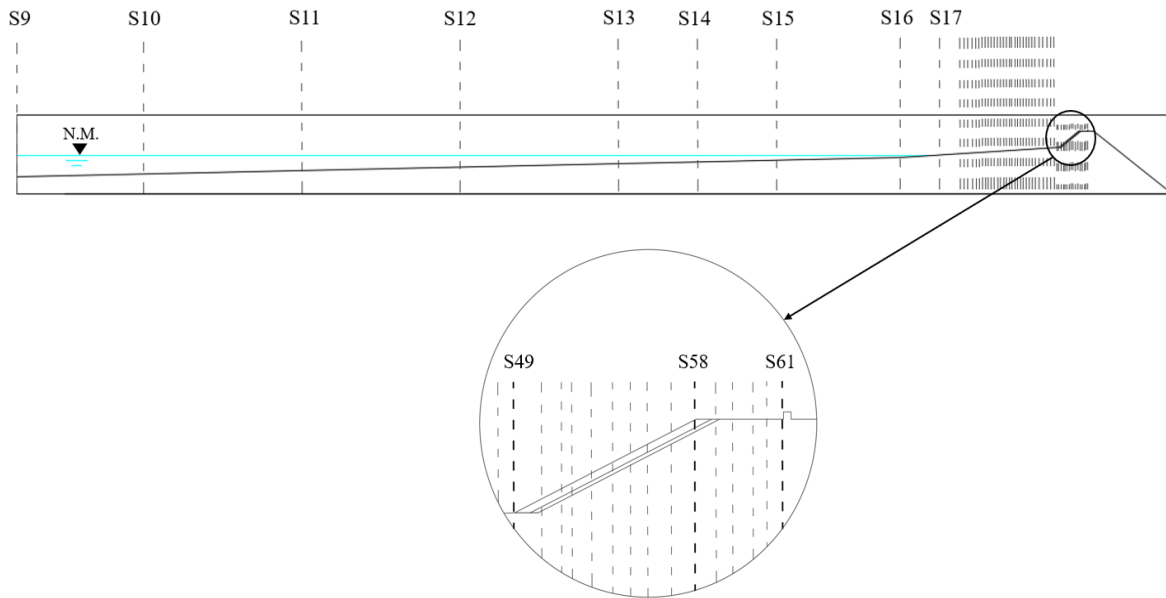


Figura 4.10 – Representação esquemática das sondas ao longo do domínio D2.

Como se observa, a primeira sonda deste domínio é a sonda S9, comum a ambos os domínios, e as sondas S10 a S17 permitem obter as séries temporais de superfície livre a barlamar da estrutura de proteção marginal, tendo sido ainda colocado um grande número de sondas ao longo da face de praia (S18 a S48). A colocação de sondas na zona do manto exterior permeável, S49 a S57, e do coroamento da defesa aderente, S58 a S61, são importantes para a obtenção de valores precisos de níveis de espraçamento das ondas incidentes e do caudal de galgamento. A última sonda, S61, localizada no coroamento da estrutura, junto a um muro vertical, mede o caudal que passa o muro e atinge a zona por ele protegida.

Em todas as simulações, a geração de ondas ocorreu por meio de um batedor estático, localizado na fronteira esquerda dos domínios, com um início suavizado de 10 s.

No domínio D1 foram geradas séries temporais de ondas regulares, baseadas na Teoria Linear das Ondas, com frequência de amostragem, F_s , de 30 Hz, e absorção ativa das ondas nas fronteiras esquerda e direita do domínio (de modo a evitar a propagação na direção contrária à

imposta pelo batedor), com altura de onda, H , igual à altura de onda significativa do caso a simular e período, T , igual ao período de pico a reproduzir.

A duração da simulação de cada caso depende essencialmente do período de onda a simular, pois cada corrida deve simular entre 50 a 100 ondas, de modo a avaliar o caudal de galgamento após a estabilização das condições de agitação que chegam à estrutura. Desta forma, apresentam-se no Quadro 4.12 os tempos considerados na geração da série temporal de caso de agitação.

Quadro 4.12 - Tempo de simulação considerado na geração de ondas, para cada caso a simular.

Caso de agitação	H [m]	T [s]	Duração [s]
1	6.47	17.08	1700
2	7.94	17.68	1800
3	8.67	19.49	1950

Após se terem obtido todos os dados necessários ao início da simulação do modelo, iniciou-se a simulação do domínio D1 para obtenção da série temporal da superfície livre na sonda numérica S9, com uma frequência de amostragem de 10 Hz. Após o fim da simulação do domínio D1, é possível então simular o domínio D2 com a reconstrução dessa série temporal.

Para além da geração das malhas respetivas a este domínio D2, é necessário selecionar a zona específica de análise do espraçamento. A simulação corre e os resultados são obtidos, mais uma vez, com uma frequência de amostragem igual a 10 Hz nas sondas numéricas, sendo que neste domínio apenas se encontra ativa a absorção de ondas na fronteira esquerda.

4.4. Resultados do modelo numérico

Inicialmente foi realizado um teste com o modelo numérico, de forma a obter o tempo de processamento do modelo para condições simplificadas da malha, isto é, com uma malha grosseira e homogénea, com discretização de 0.50 m na zona de profundidade constante e de 0.25 m na zona da estrutura, em ambas as direções do domínio. Para este caso foi gerada uma série temporal de ondas irregulares e considerou-se a geometria da estrutura completamente impermeável (sem camadas porosas). As condições de agitação foram as simuladas para o caso 1, Quadro 4.12, e não se obteve galgamento, possivelmente dada a grande dimensão dos elementos da malha, que introduzem dissipação numérica das ondas.

Após esta simulação, foi reduzida a dimensão mínima da malha total para 0.17 m (dimensão da malha obtida em testes de sensibilidade em estudos anteriores para reproduzir corretamente o galgamento) e foram adicionadas as camadas porosas à estrutura em análise. Esta

corrida foi interrompida após uma semana, tendo-se neste período gerado apenas duas ondas. Os tempos de cálculo são os apresentados no Quadro 4.13.

Não sendo viável fazer uma simulação com todo o domínio e com a discretização mínima de 0.17 m, optou-se por dividir o domínio total em dois, domínios D1 e D2, usando-se a informação da fronteira de saída do domínio D1 como dados de entrada para a geração de ondas no domínio D2. Complementarmente, foi ainda reduzido o tempo total de simulação para cerca de 10% do seu valor inicial e a série de ondas geradas de irregular para regular.

Quadro 4.13 – Tempos de corrida¹ dos casos simulados em IH-2VOF, segundo o domínio considerado.

Caso simulado			Tempo (s)		Porcentagem de conclusão	Duração da simulação (h)
			Simulado	Previsto		
Malhas de teste	Domínio total ($\Delta_{\min} = 0.25$)		17000	17000	100%	381
	Domínio total ($\Delta_{\min} = 0.17$)		17000	17000	< 1 %	171
Malhas Finais	D1 ($\Delta_{\min} = 0.17$)	Malha 1	1700	1700	100%	65
		Malha 2	1800	1800	100%	49
		Malha 3	1950	1950	100%	34
	D2 ($\Delta_{\min} = 0.17$)	Malha 1	161	1700	9%	478
		Malha 2	184	1800	10%	636
		Malha 3	118	1950	6%	626

As corridas aos primeiros domínios das malhas 1, 2 e 3, demoraram cerca de 2 a 3 dias (ver Quadro 4.13) e permitiram obter as séries temporais da superfície livre na secção de acoplamento a impor na fronteira de entrada do domínio D2.

Analisando as séries temporais nas sondas do primeiro domínio no caso referente à malha 3, Figura 4.11, observa-se de forma clara a propagação das ondas no primeiro domínio, com o empolamento da onda, o consequente aumento da altura de onda e geração de harmónicas entre as sondas 4 a 5, ocorrendo depois rebentação, com a consequente redução da altura de onda. Não se apresentam as séries temporais das sondas S2 e S3 pois não apresentavam uma variação significativa relativamente à sonda S1. A zona onde ocorre a rebentação das ondas pode ser visto também recorrendo à função *drawfast* do modelo numérico, onde é possível observar que, no caso desta malha, entre os 250 m e os 300 m, Figura 4.12, a onda está em rebentação, isto é, entre a posição das sondas 5 e 7.

¹ O tempo de corrida depende da capacidade de processamento do computador utilizado. Desta forma, especificam-se em seguida as componentes do computador utilizado na simulação, para os três casos em estudo:

- Processador: Intel® Core™ i7-5820K CPU@3.3GHz ; Ram: 32 GB ; Sistema operativo: Windows 10.

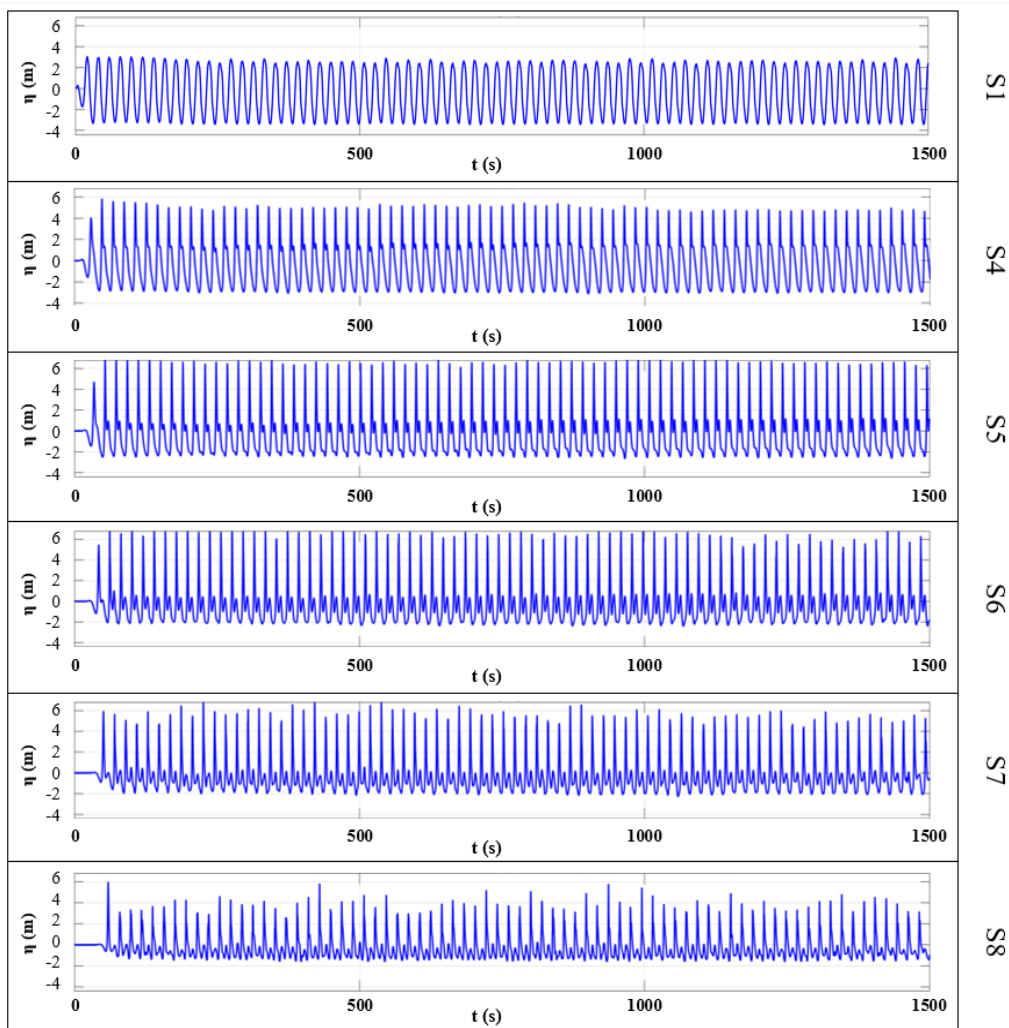


Figura 4.11 - Variação da elevação da superfície livre nas sondas do domínio D1, malha 3.

Em relação aos cálculos do domínio D2, não foi possível completar nenhuma simulação de qualquer das três malhas devido ao seu tempo de processamento (da ordem de 4 semanas para 9 ondas geradas). Durante o tempo de corrida destes segundos domínios não se obteve galgamento.

Assim, verificou-se que o tempo de cálculo, mesmo dividindo o domínio em dois, é demasiado elevado, o que inviabiliza o uso desta ferramenta para apoio ao projeto deste tipo de obras. A necessidade de divisão do domínio total em dois subdomínios de menor dimensão motivou a análise do acoplamento entre D1 e D2, que como descrito previamente, se dá por meio da reconstrução da série temporal de ondas da última sonda do primeiro domínio, essencial na geração do batedor de ondas para o segundo domínio. Como referido anteriormente, as velocidade, u e v , são calculadas pelo modelo aquando da geração do batedor.

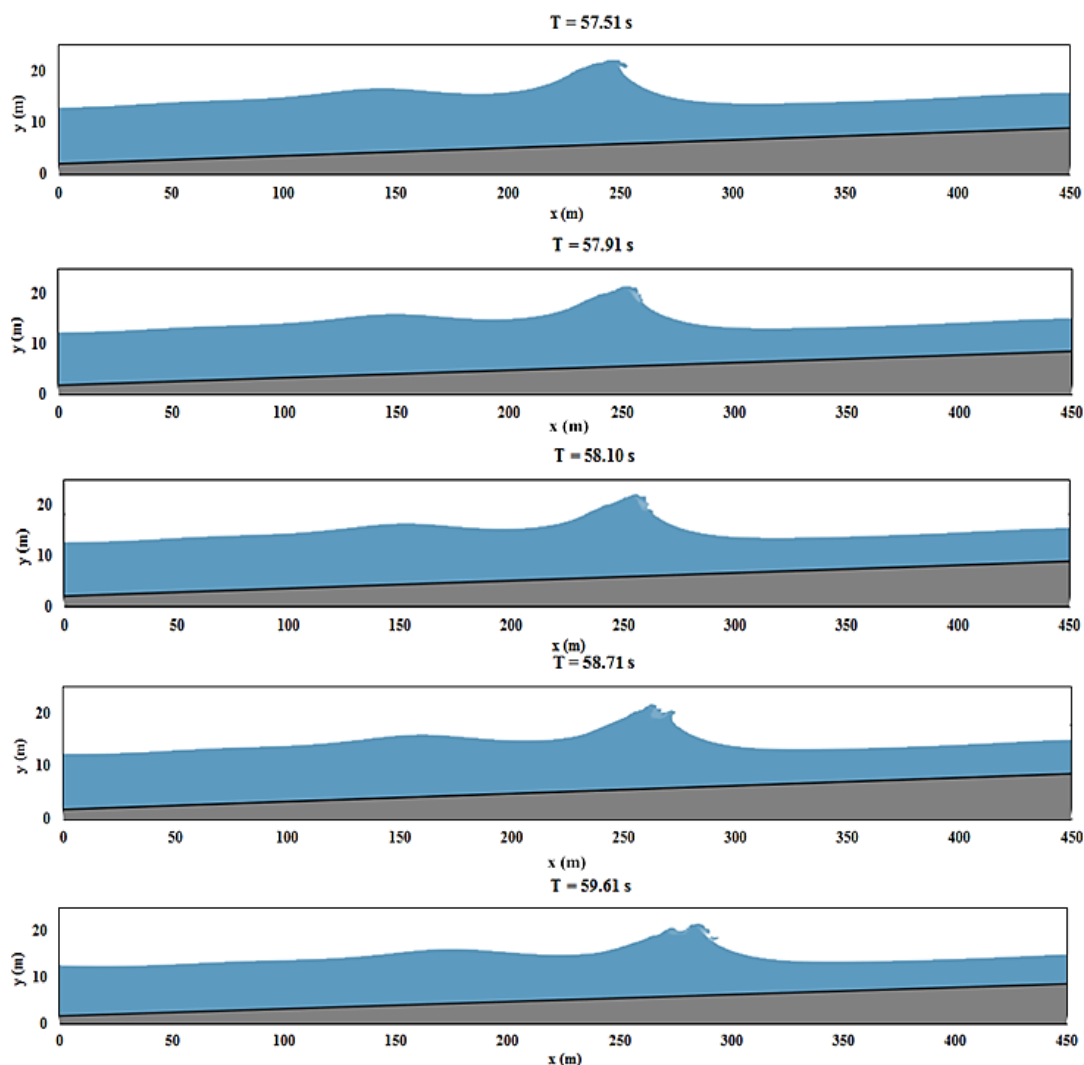


Figura 4.12 - Instantes (e posições) em que se inicia a rebentação das ondas no domínio D1, malha 3.

Para analisar do erro cometido ao se separar o domínio em dois, analisaram-se as diferenças entre as séries temporais de elevação de superfície livre, η , e das velocidades horizontal e vertical, u e v , na sonda de acoplamento do domínio 1, tal como as da secção de entrada do domínio D2, reconstruídas para geração do batedor neste domínio. Os valores correspondentes a cada série temporal foram obtidos a uma profundidade de -7.9 m (Z.H.), na secção de acoplamento. Na Figura 4.13 apresenta-se a série temporal de η na sonda de acoplamento (nº9 no caso das malhas 1 e 2, e nº8 na malha 3) e a série da reconstruída para as três malhas simuladas.

Como se pode observar, existe uma boa concordância entre os valores da sonda de acoplamento do domínio D1 e os da entrada do domínio D2, especialmente para as malhas 1 e 2. Nas malhas 2 e 3, a elevação da superfície livre nos primeiros instantes é nula, correspondendo ao período de tempo entre o início do funcionamento do batedor e a chegada da onda à posição da sonda no domínio D1. Na malha 1 este tempo foi retirado.

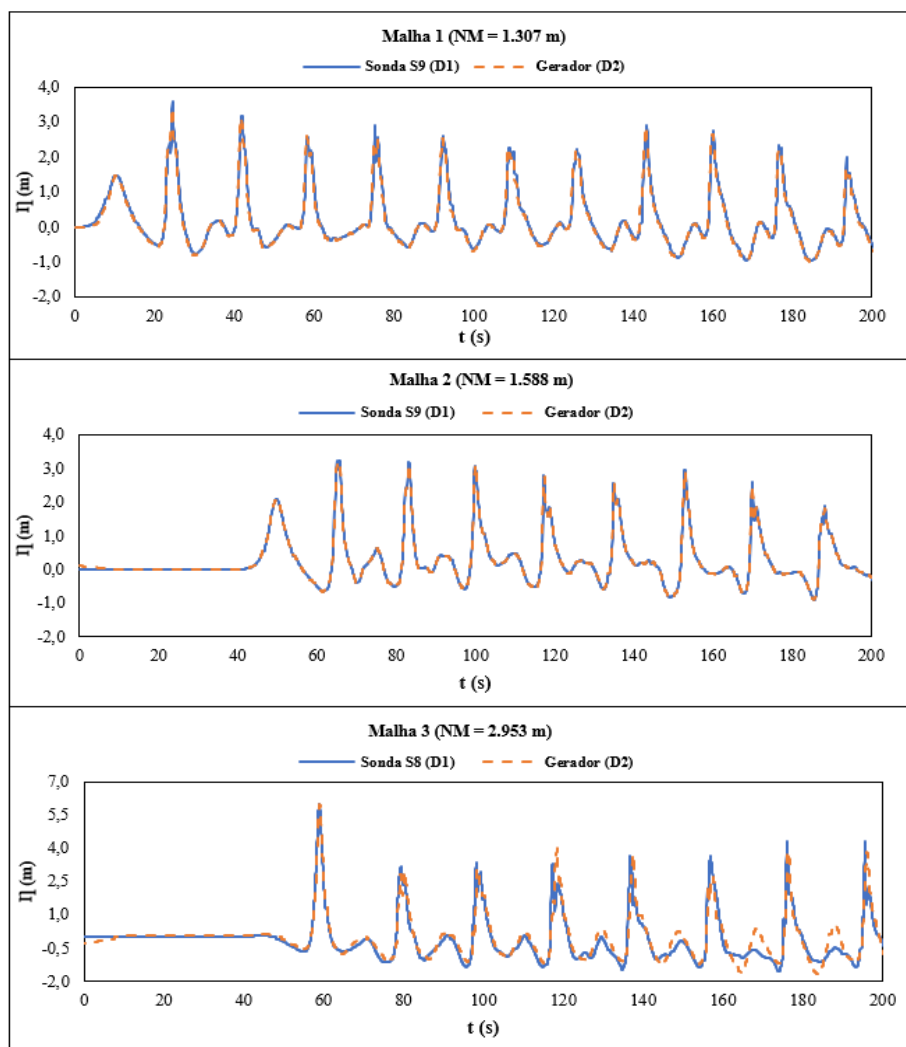


Figura 4.13 – Série temporal da elevação da superfície livre na sonda de acoplamento do domínio D1 e a reconstruída na secção do bater no domínio D2, para as malhas 1, 2 e 3.

A malha 3, com uma discretização mais grosseira que as duas restantes, apresenta um pior ajustamento na sonda de acoplamento. Ao analisar a diferença no tempo da superfície livre na sonda em D1 e a reconstruída em D2 para cada malha, Figura 4.14, observa-se de forma clara esta discrepância de valores entre malhas. Considerando o mesmo período de análise nos três casos simulados, compreendido entre os 100 e os 160 [s], as malhas 1 e 2 possuem diferenças máximas entre 0.10 e 0.35 [m], respetivamente, enquanto que a malha 3 apresenta diferenças de 2.5 m.

Relativamente aos campos de velocidades, observa-se na Figura 4.15 a velocidade horizontal na secção de acoplamento, das malhas 1, 2 e 3, ao longo do tempo simulado.

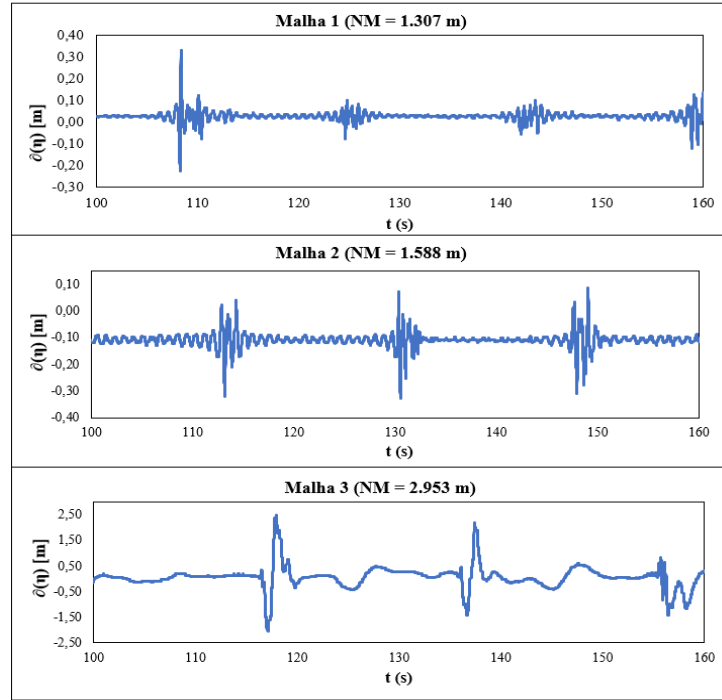


Figura 4.14 - Diferença da elevação da superfície livre entre as séries temporais da sonda de acoplamento em D1 e da na secção de geração em D2, para as malhas 1, 2 e 3.

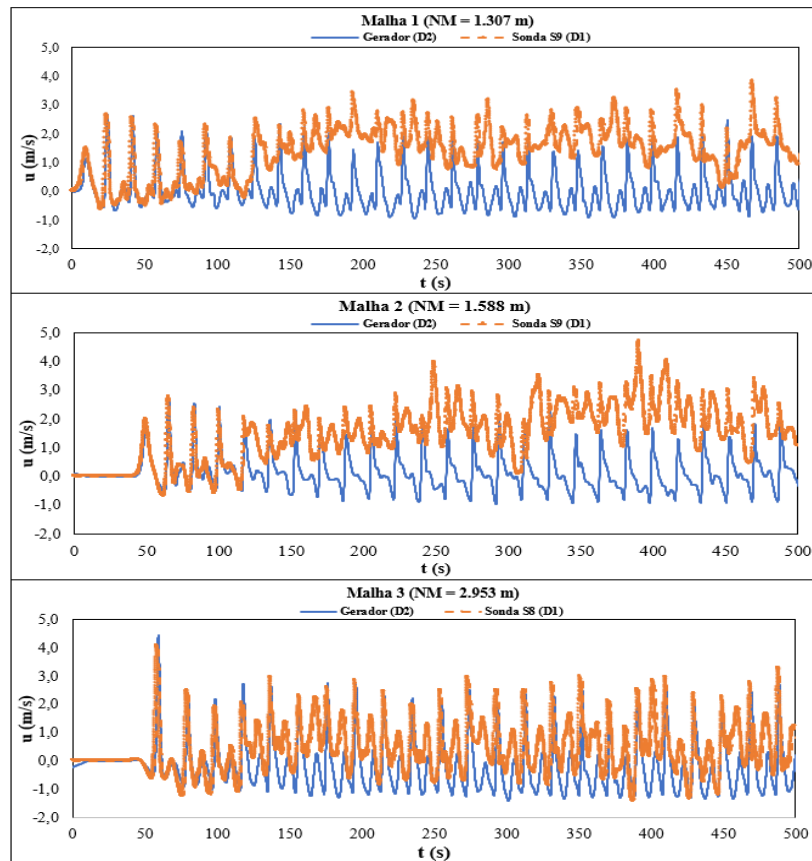


Figura 4.15 - Velocidades horizontais das partículas ao longo do tempo simulado, na sonda de acoplamento do domínio D1 e na secção do bater no domínio D2.

Em todas as malhas se observa que a velocidade na sonda de acoplamento sofre um aumento a partir dos 100 s, passando as velocidades a variar, na malha 1, por exemplo, entre 1 e 3 [m/s], enquanto as velocidades reconstruídas pelo batedor no segundo domínio apresentam, para o mesmo período, uma variação entre -0.5 e 2 [m/s], tal como ocorria no início da simulação. Esta diferença corresponde a uma corrente que está presente no domínio D1 e que o batedor, ao calcular a velocidade com base na superfície livre, não reproduz.

A variação no tempo da velocidade vertical, nas malhas 1, 2 e 3, é apresentada na Figura 4.16. Comparando as velocidades verticais nos domínios D1 e D2 em cada caso simulado, é possível observar que, embora não se verifique existir diferenças na velocidade média entre as sondas de acoplamento e a reconstrução no domínio D2, tal como ocorre para u , existe um aumento da velocidade máxima gerada pelo batedor relativamente à medida na secção de acoplamento do domínio D1. Para a malha 3 nota-se ainda uma diferença no nível de v médio.

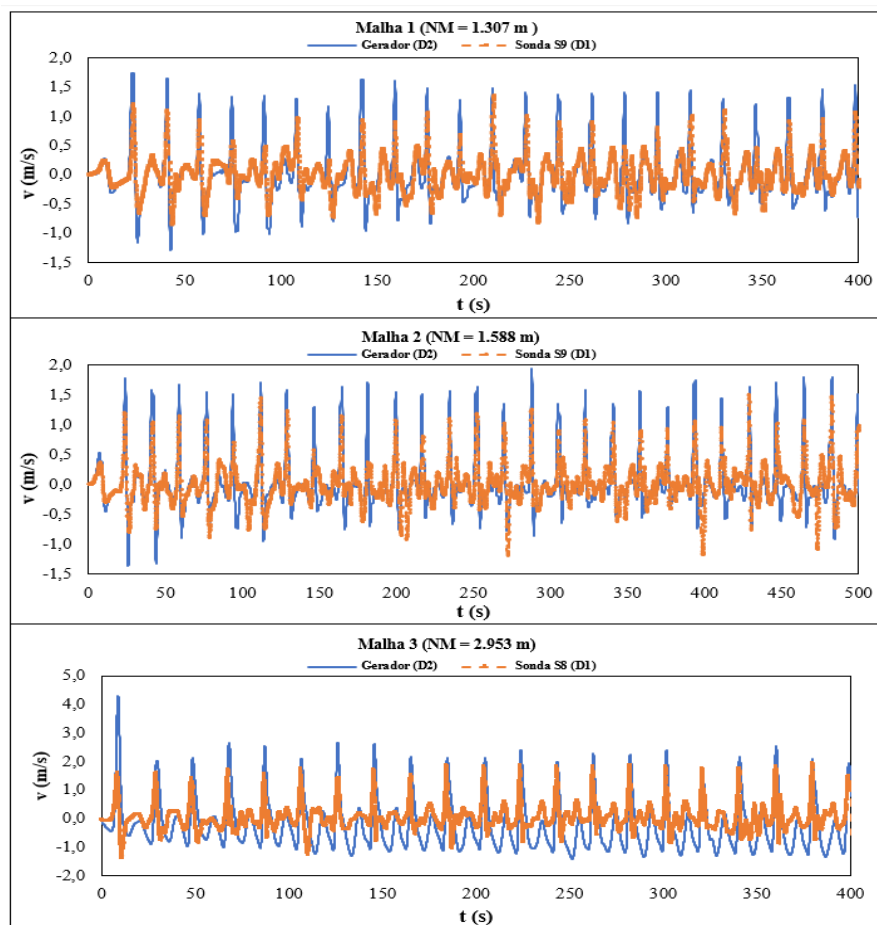


Figura 4.16 - Velocidades verticais das partículas ao longo do tempo simulado, na sonda de acoplamento do domínio D1 e na secção do batedor no domínio D2, para as malhas 1, 2 e 3.

A análise quer da série temporal da superfície livre, quer das velocidades, permite identificar que o acoplamento de domínios implementado no IH-2VOF não é correto e altera os dados quando a secção de acoplamento se encontra após a zona de rebentação das ondas, já que a geração com o batedor modifica as velocidades na secção de acoplamento, especialmente a velocidade horizontal, alterando os resultados na secção de interesse do estudo, a secção onde se localiza a estrutura e onde se pretende obter o galgamento.

Capítulo 5 - Análise do galgamento

Neste capítulo calcula-se e analisa-se o caudal médio de galgamento obtido pela fórmula aplicável ao caso de estudo, i.e., a fórmula Mase *et al.*, que passa na estrutura de proteção marginal da costa de Cova-Gala, já descrita na secção 2.2.

Realiza-se ainda uma análise de sensibilidade dos fatores de redução do galgamento ou espraçamento aplicáveis à fórmula, tanto ao nível da direção de propagação das ondas, como da rugosidade das camadas constituintes da estrutura de proteção, no sentido de avaliar de que modo afetam os resultados de caudal médio galgado calculados pela fórmula.

Em seguida, foi avaliada a influência da mais recente alteração da fórmula de Mase *et al.*, proposta por Masatoshi *et al.*, no cálculo do caudal galgado, através de uma análise comparativa dos resultados sob as mesmas condições de agitação, nível de mar e fatores de redução.

Por fim, foram analisados os caudais médios obtidos pela fórmula Mase *et al.* e da fórmula proposta pelo manual EuroTop, muito utilizada por projetistas, de modo a avaliar as diferenças obtidas do galgamento, embora a fórmula proposta no Eurotop se encontre fora dos limites de validade, dado o nível do mar em repouso se situar muito abaixo da cota do pé da estrutura marginal.

5.1. Parâmetros de cálculo

O cálculo do galgamento por fórmulas empíricas depende, em geral, de três conjuntos de parâmetros, referentes às características da estrutura em análise, às condições de agitação incidentes nessa estrutura e os parâmetros empíricos da fórmula e/ou os fatores de redução a aplicar às fórmulas. Apresenta-se em seguida um resumo dos valores dos parâmetros utilizados no caso de estudo desta dissertação, isto é, para uma estrutura de proteção marginal e para a aplicação da fórmula de Mase *et al.*. Os parâmetros referentes à estrutura de proteção marginal em estudo nesta dissertação, essenciais ao cálculo do galgamento, foram os especificados na secção 3.2, não se apresentando aqui novamente.

Relativamente às condições de agitação consideradas, foi feito o cálculo do galgamento para todas as condições de agitação apresentadas em 3.3, isto é, para 58 anos de dados num ponto em frente à estrutura em análise, a uma profundidade de 14 m. Para se ter uma ideia dos valores destes parâmetros, apresenta-se aqui a análise dos valores de H_{m0} , T_p e Dir , ao longo do período estudado.

No que se refere à altura de onda significativa, H_{m0} , a variação da altura mínima anual é pequena, variando entre 0 e 0.5 [m]. Os valores máximos anuais apresentam maior variação de valores, entre 7 e 11 [m], como se pode observar na Figura 5.1, onde se apresentam os valores máximos e mínimos anuais de H_{m0} no período em análise.

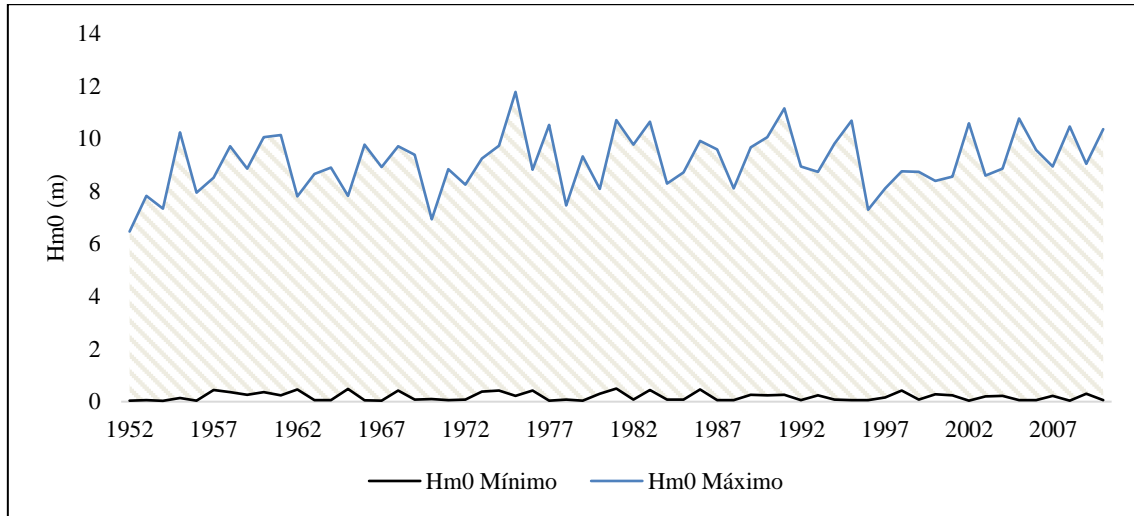


Figura 5.1 - Valores máximos e mínimos anuais de H_{m0} , entre 1952 e 2010.

Em relação ao período de pico, T_p , entre 1952 e 2010, os valores máximos e mínimos anuais são apresentados na Figura 5.2. Os valores máximos e mínimos anuais do período de pico apresentam uma variação semelhante, com os períodos mínimos anuais a manterem-se ao redor dos 6 s, enquanto os períodos máximos anuais, apesar de em geral rondarem os 23 s, exibirem valores até 27 s em quatro anos (1971, 1974, 2004 e 2010).

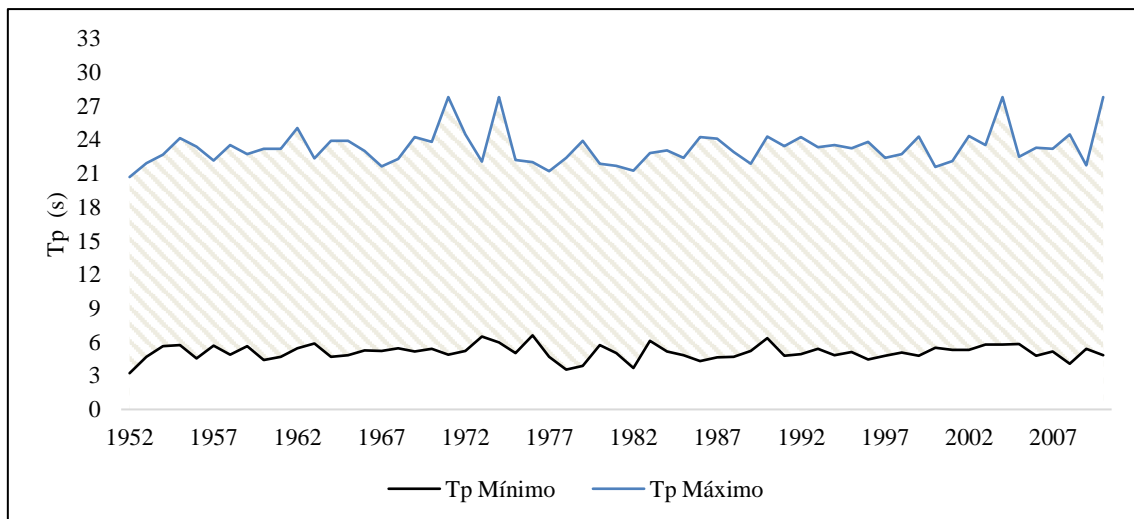


Figura 5.2 - Valores máximos e mínimos anuais de T_p , entre 1952 e 2010.

Por fim, analisam-se os valores máximos e mínimos anuais da direção média de incidência da agitação, Dir (Figura 5.3). Observa-se que os valores máximos anuais da direção incidente da agitação se mantiveram aproximadamente sem alteração entre 1952 e 2010, por volta dos 350°, enquanto os valores mínimos anuais apresentaram maiores oscilações, entre os 200° (S 20° O) e os 250° (O 20° S).

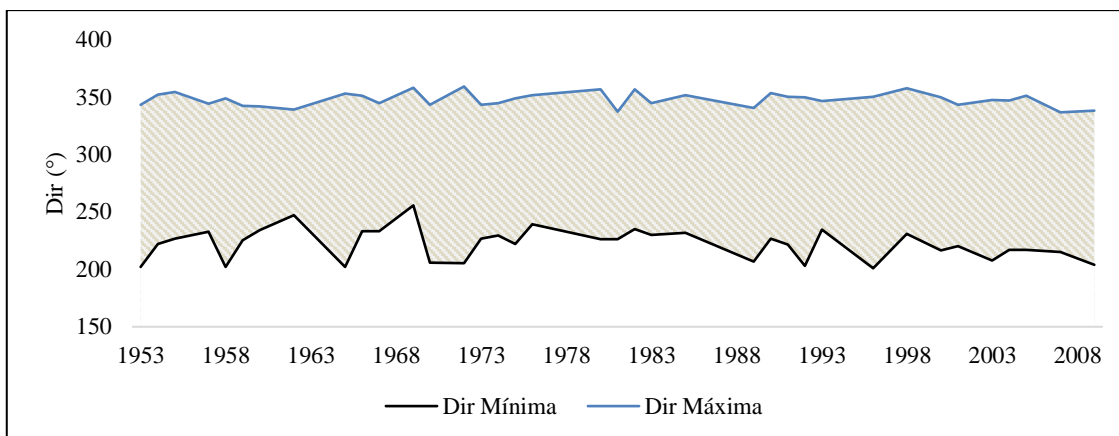


Figura 5.3 - Variação anual máxima e mínima de Dir, entre 1952 e 2010.

No que se refere ao nível do mar no período em análise, NM, na Figura 5.4 apresentam-se os seus valores máximos e mínimos anuais. Da análise dos valores limite anuais de NM ao longo do período em estudo, observa-se que qualquer subida (ou descida) de nível máximo é acompanhada por uma descida (ou subida) do nível mínimo. Destaca-se a estabilização dos valores máximos anuais nas duas últimas décadas, isto é, a partir de 1986, em torno dos 0 m de nível mínimo anual e dos 4 m de nível máximo anual, semelhantes aos valores ocorridos entre 1962 e 1971.

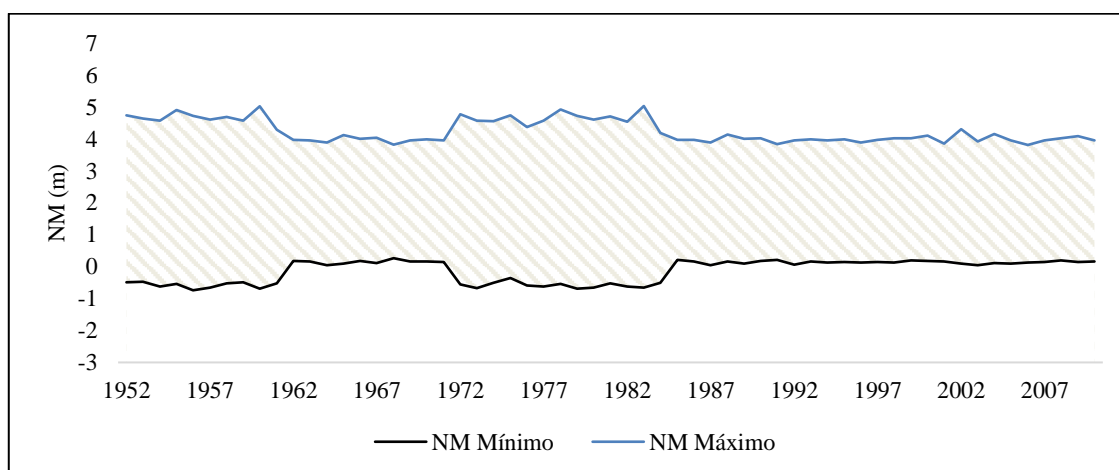


Figura 5.4 - Variação anual máxima e mínima do NM, entre 1952 e 2010.

Para complementar esta análise das condições gerais de agitação usadas no cálculo do galgamento, apresentam-se, no Quadro 5.1, os valores máximos e mínimos absolutos verificados no tempo de análise para cada um dos parâmetros analisados anteriormente.

Quadro 5.1 – Valores máximos e mínimos de H_{m0} , T_p , Dir e NM usados no cálculo do galgamento.

	Mínimo	Máximo
H_{m0} (m)	0.03	11.78
T_p (s)	3.22	27.78
Dir (°)	200.92	359.61
NM (m)	-0.74	5.03

No que diz respeito aos fatores de redução a aplicar à fórmula de Mase *et al.*, cuja definição se pode encontrar na secção 2.3.3., foram seleccionados como parâmetros iniciais os valores apresentados no Quadro 5.2. Para analisar a sua influência, variaram-se estes valores dentro dos limites apresentados neste quadro.

Quadro 5.2 – Fatores de redução usados no cálculo do galgamento.

Fator de redução	Valor base	Gama de variação
γ_f	0.65	0.70 - 0.90
γ_b	0	0 - 1

5.2. Resultados das fórmulas

5.2.1. Resultados relativos aos parâmetros de base

Com os valores de base dos parâmetros de entrada da fórmula indicados na secção anterior e definidos no capítulo 3, aplicou-se a fórmula de Mase *et al.*, e obteve-se um conjunto de valores de caudais médios de galgamento, q . Na Figura 5.5 apresentam-se esses resultados adimensionalizados por $\sqrt{gH_{m0}^3}$, em função de R_c/H_{m0} . Estes caudais servem de referência para a análise de sensibilidade à variação dos valores dos fatores de redução, de forma a analisar o efeito que os diferentes valores que se aplicam apresentam na variação do caudal médio galgado obtido e, consequentemente, no número de eventos de galgamento em determinada gama de valores. Como esperado, quanto maior o valor de R_c/H_{m0} , menor o valor de $q/\sqrt{gH_{m0}^3}$, que decresce exponencialmente para valores inferiores a 10^{-10} a partir de R_c/H_{m0} da ordem dos 2.5.

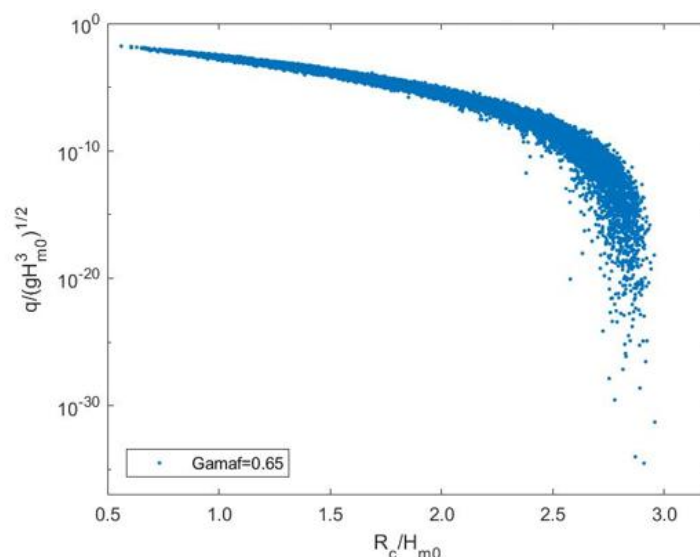


Figura 5.5 – Caudais médios galgados adimensionalizados, determinados segundo a fórmula de Mase *et al.* no período em análise.

Obtiveram-se, com os valores de caudal calculados com os parâmetros de base, o número de eventos de galgamento em seis intervalos distintos de q , Quadro 5.3, de acordo com os limites admissíveis apresentados em 2.1. Registou-se um total de 13543 eventos com caudal não nulo, cerca de 19% dos eventos totais analisados, que se encontra distribuído por essas seis classes tal como se apresenta na Figura 5.6.

Quadro 5.3 - N° de eventos de galgamento por intervalos de caudal.

q (l/s/m)	N° de eventos
]0;0.01]	3948
]0.01;0.1]	2401
]0.1;1]	2532
]1;10]	2389
]10;100]	1711
>100	562
Total	13543

O agrupamento dos eventos de galgamento segundo o caudal galgado permite realizar uma avaliação da sua perigosidade. Cerca de 71% dos eventos não nulos e 11% do total representam perigo para as viaturas circulantes nas proximidades da estrutura ($q > 0.01$ l/s/m); 53% dos eventos não nulos e 8% do total representam perigo para o peões na proximidades da estrutura de proteção ($q > 0.1$ l/s/m); 42% dos eventos não nulos e 7% do total representam perigo para propriedades situadas a 5-10 metros da estrutura de proteção ($q > 0.4$ l/s/m); 2% dos eventos não nulos e 0.3% do total apresentam perigo para a própria estrutura de proteção ($q > 200$ l/s/m).

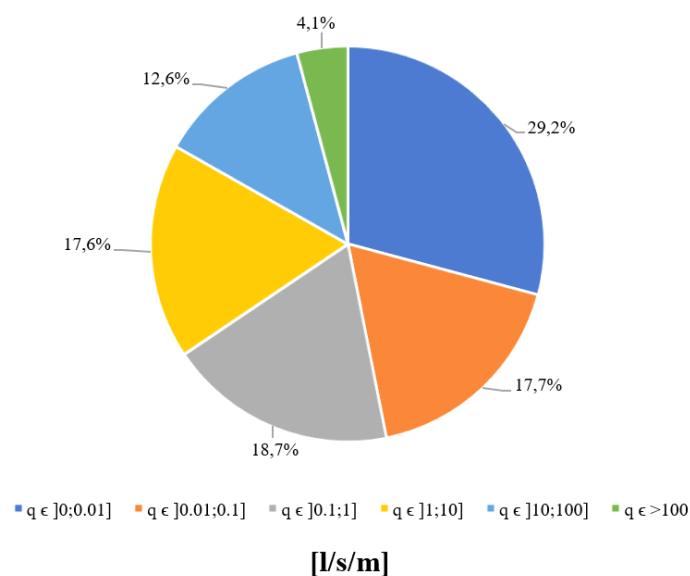


Figura 5.6 - Percentagem de eventos de galgamento, do caudal de base, segundo diferentes limites de caudal.

5.2.2. Influência do fator de redução devido ao atrito

Para o estudo da influência do fator de redução devido ao atrito, determinaram-se os caudais de galgamento médios pela equação de Mase *et al.*, para valores de γ_f compreendidos entre 0.65 e 0.90, em intervalos de 0.05, para os dados de agitação marítima registados entre 1952 e 2010. Os valores de caudal médio galgado adimensionalizado obtidos para γ_f de 0.65, 0.70 e 0.75 são apresentados na Figura 5.7 e para 0.8, 0.85 e 0.9 na Figura 5.8.

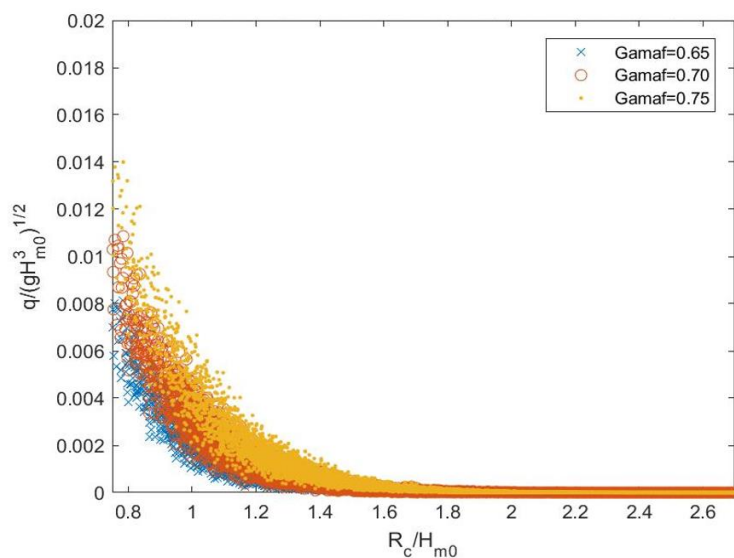


Figura 5.7 - Caudais de galgamento adimensionais, determinados segundo Mase et al., para valores de γ_f entre 0.65 e 0.75.

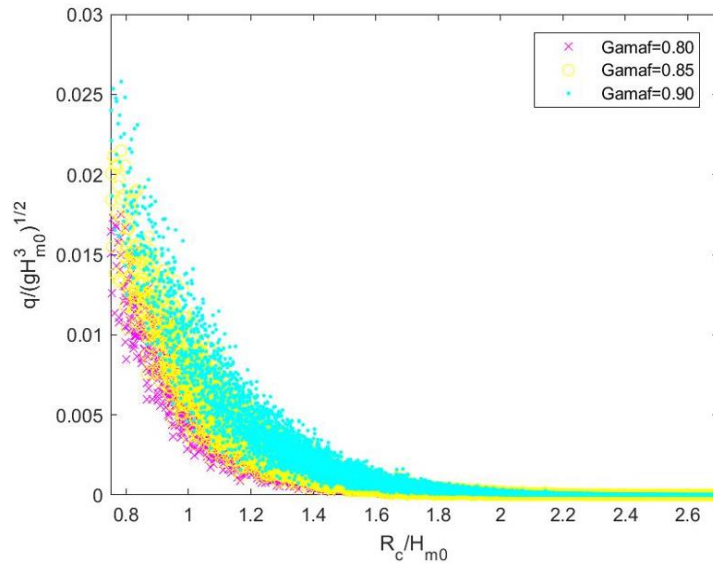


Figura 5.8 - Caudais de galgamento adimensionais, determinados segundo Mase et al., para valores de γ_f entre 0.80 e 0.90.

Da análise das figuras pode-se verificar que, para todos os valores de γ_f testados, o caudal médio adimensionalizado diminui à medida que a razão entre a distância R_c e a altura espectral da onda aumenta, com caudais quase nulos quando se atinge um valor desta razão superior a cerca de 2.5, tal como se verificou para o caso base. Nota-se ainda que quanto maior o valor de γ_f , maior o caudal médio adimensionalizado. Efetivamente, γ_f igual a 0.9, o maior testado, corresponde à rugosidade mais baixa, e como tal, é o que leva a uma menor redução do galgamento por atrito, ou seja, permite a passagem de maior galgamento pela estrutura devido ao baixo atrito nos elementos constituintes da estrutura. A redução média de caudal galgado é de aproximadamente 41% quando se reduz de $\gamma_f = 0.9$ para 0.8 e de 52% quando se reduz de $\gamma_f = 0.75$ para 0.65. A fim de se analisar em mais detalhe as diferenças para os valores mais reduzidos de caudal médio, nas Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam-se os resultados, em escala logarítmica, dos mesmos valores de caudal médio galgado adimensionalizado, onde se observa com mais clareza as diferenças dos caudais de galgamento para diferentes valores de γ_f .

Pela análise das figuras apresentadas, observa-se que, para valores de caudais adimensionalizados acima de 10^{-5} , a diferença média de caudal quando o γ_f varia de 0.05, é da ordem de 0.016. No entanto, para caudais adimensionais muito pequenos, isto é, caudais inferiores a 10^{-10} , é possível observar que esta diferença do caudal adimensionalizado aumenta com a diminuição dos valores de caudal para R_c/H_{m0} entre 3 e 4, para γ_f entre 0.8 e 0.9.

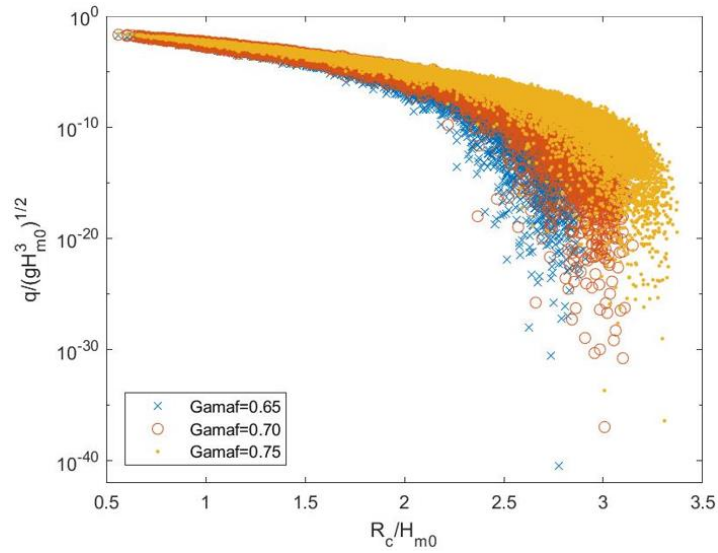


Figura 5.9 - Caudais de galgamento adimensionalizado, determinados segundo Mase *et al.*, para γ_f entre 0.65 e 0.75 (representação logarítmica).

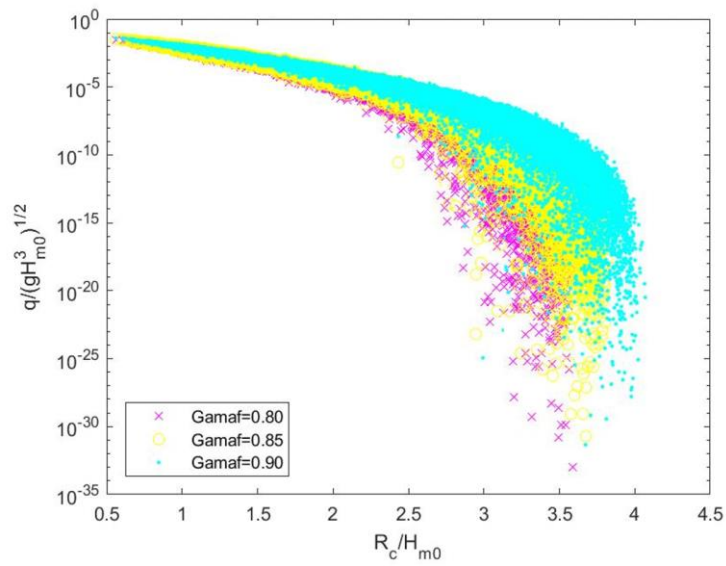


Figura 5.10 - Caudais de galgamento adimensionalizado, determinados segundo Mase *et al.*, para γ_f entre 0.80 e 0.90 (representação logarítmica).

Ao comparar os caudais médios galgados para diferentes valores de γ_f , observa-se uma variação menos acentuada entre caudais determinados com valores de γ_f menores (Figura 5.11) do que entre valores de caudais que apresentam γ_f mais elevados (Figura 5.12), já mencionada previamente.

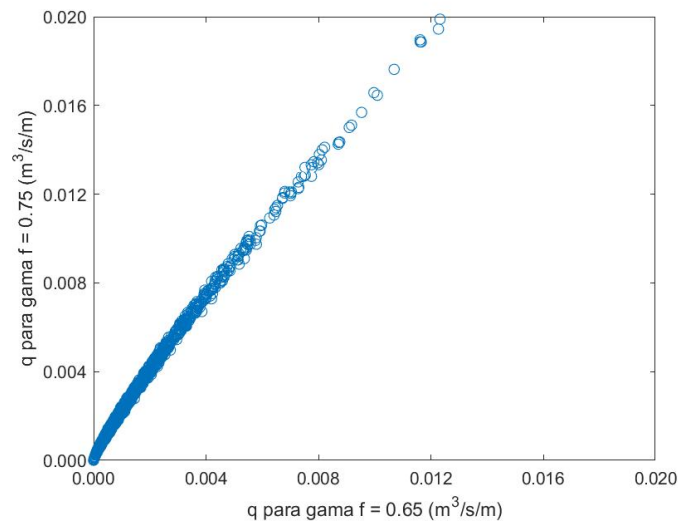


Figura 5.11 - q obtido pela fórmula de Mase *et al.* para γ_f de 0.65 e 0.75.

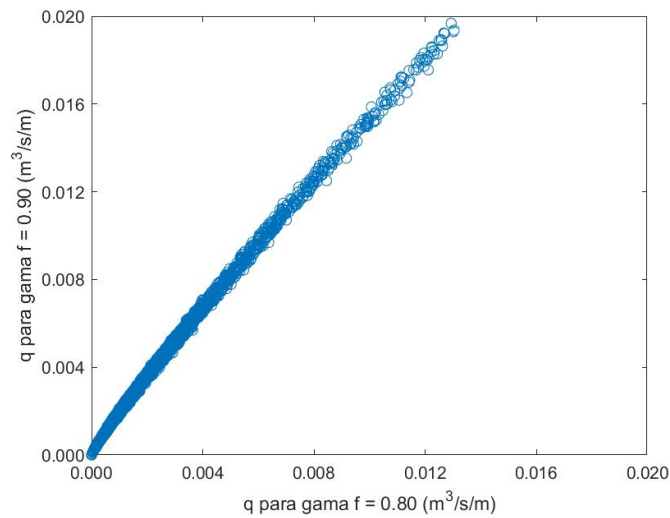


Figura 5.12 - q obtido pela fórmulas de Mase *et al.*, para γ_f de 0.80 e 0.90.

Com base nos resultados, calculou-se o número de eventos de galgamento registados entre 1952 e 2010 por gamas de caudais e para cada γ_f , Figura 5.13 e Quadro 5.4. Mais uma vez é possível observar a ocorrência gradual de um maior número de eventos de galgamento à medida que o valor de γ_f decresce, em todas as classes de limites admissíveis de galgamento, verificando - se ainda que, independentemente do valor do fator de redução, mais de 50% dos valores dos caudais não nulos excede os 0.4 l/s/m e é inferior a 200 l/s/m, significando que a maioria dos caudais analisados pode representar perigo para quaisquer propriedades nas proximidades (5 a 10 [m]) da estrutura de proteção. Complementando a análise relativa à influência deste coeficiente, observa-se que para todos os valores de γ_f mais de 70% de eventos de galgamento constituem

perigo para a circulação de veículos. No caso dos eventos de galgamento perigosos para a estrutura de proteção, excedendo os 200 l/s/m, apenas 2 a 5 [%] são considerados perigosos.

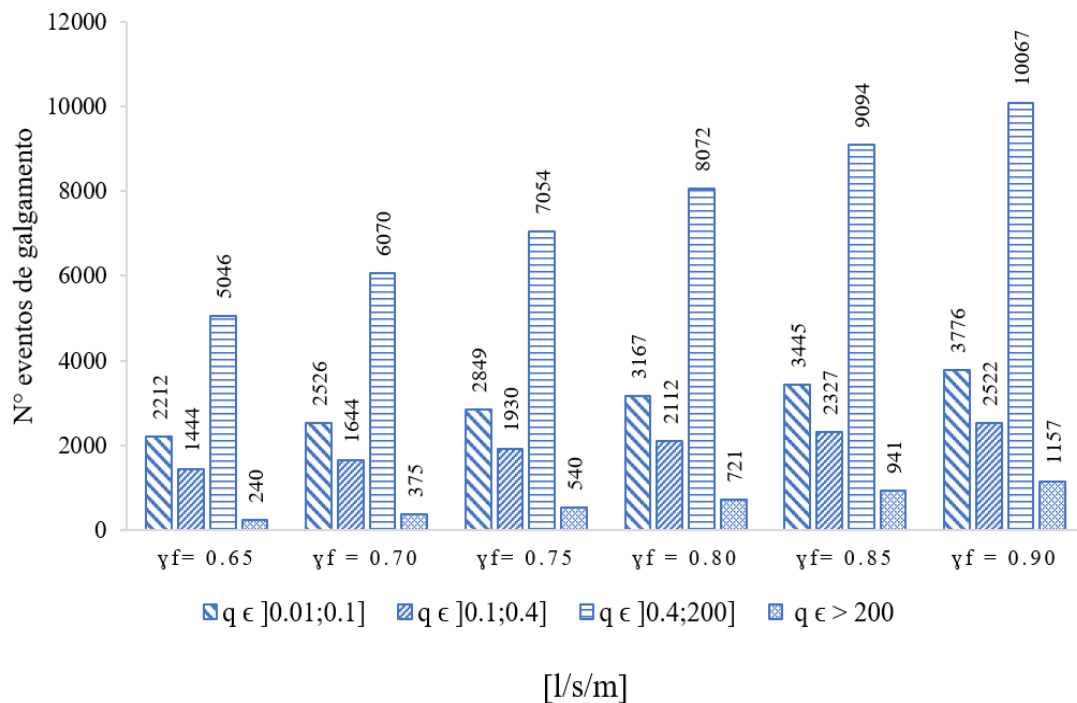


Figura 5.13 - Distribuição dos eventos de galgamento por gama de caudais médios, para diferentes valores de γ_f .

Quadro 5.4 - N° de eventos de galgamento por gama de caudais médios, para diferentes valores de γ_f .

q (l/s/m)	Nº eventos					
	$\gamma_f = 0.65$	$\gamma_f = 0.70$	$\gamma_f = 0.75$	$\gamma_f = 0.80$	$\gamma_f = 0.85$	$\gamma_f = 0.90$
]0.01;0.1]	2212	2526	2849	3167	3445	3776
]0.1;0.4]	1444	1644	1930	2112	2327	2522
]0.4;200]	5046	6070	7054	8072	9094	10067
> 200	240	375	540	721	941	1157

Finalmente, no Quadro 5.5 apresenta-se o número máximo anual de eventos nas diferentes gamas de caudais. Como se pode observar, o ano mais recente em que ocorreu um número máximo de caudal nas diferentes gamas foi em 2007, e foi precisamente nas duas gamas de valores de caudal superiores e para os maiores valores de γ_f .

Quadro 5.5 - N° de eventos de galgamento máximos registados, com o respetivo ano da sua ocorrência, para as diferentes gamas de valores de caudais, para os valores de γ_f em análise.

q (l/s/m)	N° eventos (máximo/ano)					
	$\gamma_f = 0.65$	$\gamma_f = 0.70$	$\gamma_f = 0.75$	$\gamma_f = 0.80$	$\gamma_f = 0.85$	$\gamma_f = 0.90$
]0.01;0.1]	63 (1962)	69 (1996)	80 (1996)	83 (1961)	83 (1963)	95 (1963)
]0.1;0.4]	45 (1968)	46 (1988)	71 (1962)	69 (1996)	65 (1996)	74 (1961)
]0.4;200]	158 (1995)	181 (1995)	203 (1995)	226 (1995)	243 (1995)	259 (2007)
> 200	18 (1977)	23 (1977)	25 (1960)	33 (2007)	43 (2007)	50 (2007)

Resumindo os resultados obtidos, verifica-se que o valor de γ_f utilizado condiciona significativamente o valor do caudal obtido pela fórmula e, consequentemente, o número de eventos com perigosidade de diferente tipo, devendo, por isso, ser cuidadosamente escolhido o valor a adotar e se possível, calibrado com modelação física ou numérica.

5.2.3. Influência do fator de redução devido ao ângulo de ataque da onda

Procedeu-se à análise, nesta seção, do modo como o coeficiente γ_β influencia o caudal de galgamento calculado por Mase *et al.*, ao afetar diretamente o espraçamento não excedido em 99% dos casos. Para tal, foram calculados, para todas as condições de agitação e para $\gamma_f = 0.65$, o caudal médio galgado sem e com o fator de correção γ_β . Na Figura 5.14 apresenta-se o caudal adimensionalizado em função de R_c/H_{m0} para estes dois casos.

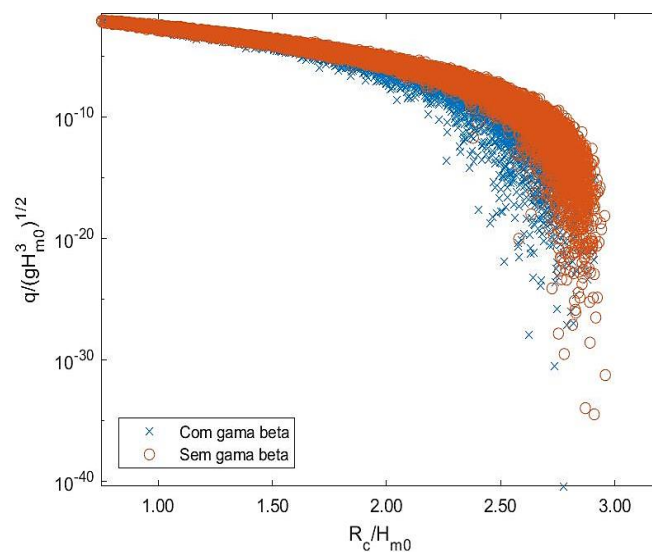


Figura 5.14 - Caudais de galgamento calculados com Mase *et al.*, com e sem considerar a influência do fator de redução devido ao ângulo de ataque da onda (distribuição logarítmica).

Pela análise da distribuição dos caudais determinados com γ_β nulo e calculado pelas fórmulas 2.8 e 2.9, observa-se que o fator de correção leva a uma redução de caudal nos casos em que o ângulo difere mais da perpendicular à estrutura, variando essa diferença entre 0.1% e 98.8%. Ambos os casos apresentam caudais adimensionais mínimos na ordem dos 1×10^{-30} , com valores ligeiramente superiores nos caudais sem influência de γ_β .

No Quadro 5.6 apresentam-se o número de eventos de galgamento identificados para ambos os casos, isto é, com e sem γ_β , para as diferentes gamas de caudais associadas aos limites admissíveis de segurança, incluindo o número máximo anual de eventos e o respetivo ano que lhe está associado. Como se pode observar, o facto de se ter em conta o fator de redução devido ao ângulo de incidência reduz o número de eventos em todas as gamas, mostrando a clara influência deste fator no caso de agitação com ângulos que diferem consideravelmente da perpendicular à estrutura.

Quadro 5.6 - Número de eventos de galgamento por gama de caudais, com e sem γ_β , número máximo anual de eventos de galgamento e respetivo ano.

q (l/s/m)	Nº eventos		Nº eventos (máximo/ano)	
	Sem γ_β	Com γ_β	Sem γ_β	Com γ_β
]0.01;0.1]	2401	2212	69 (1962)	63 (1962)
]0.1;0.4]	1542	1444	45 (1999)	45 (1968)
]0.4;200]	5371	5046	163 (1995)	158 (1995)
> 200	281	240	20 (1977)	18 (1977)

Para analisar a variação anual do número de eventos com caudais de galgamento numa determinada gama, com e sem γ_β , apresentam-se nas Figura 5.15 a Figura 5.18 os valores das gamas correspondentes aos valores limite de segurança para veículos, pessoas, propriedades e estruturas de proteção, respetivamente.

Observa-se que, na maioria dos anos analisados, o número de eventos anuais em cada gama de caudais obtidos, sem γ_β , é semelhante ou superior ao obtido para caudais calculados com consideração deste coeficiente de redução, sendo a diferença entre ambos os casos mais acentuada nos caudais que excedem os 200 l/s/m.

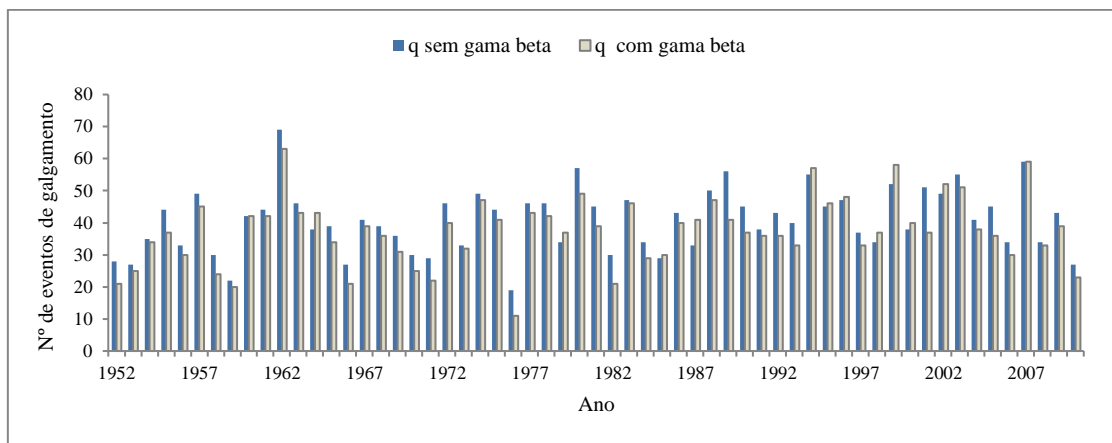


Figura 5.15 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de γ_β , entre 0.01 e 0.1 [l/s/m].

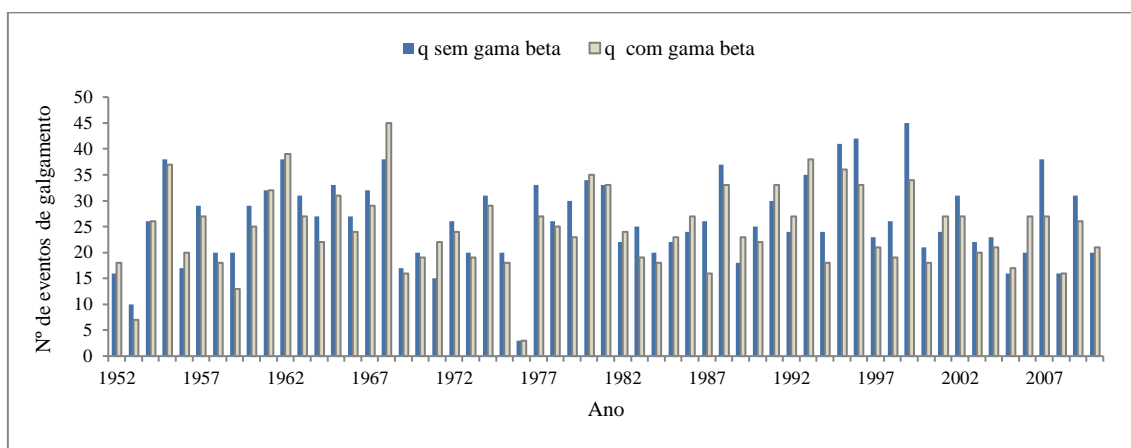


Figura 5.16 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de γ_β , entre 0.1 e 0.4 [l/s/m].

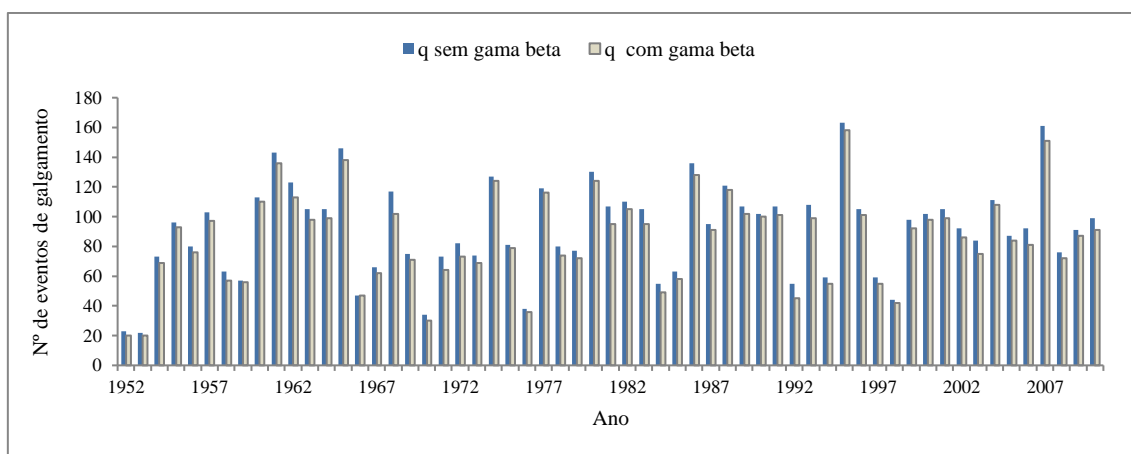


Figura 5.17 - Número de eventos anuais de galgamento registados, para os caudais determinados com e sem influência de γ_β , entre 0.4 e 200 [l/s/m].

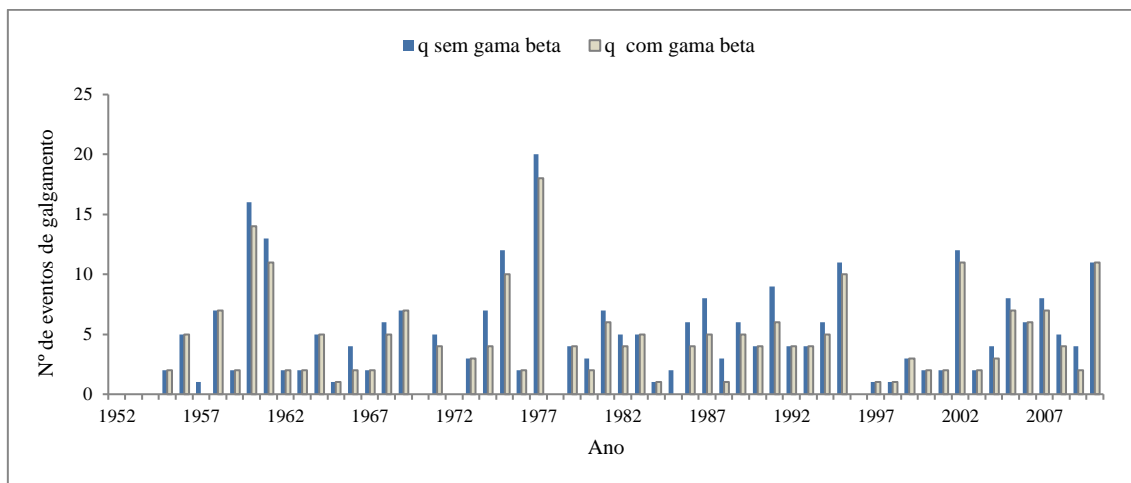


Figura 5.18 - Número de eventos anuais de galgamento registrados, para os caudais determinados com e sem influência de γ_β , superiores a 200 l/s/m.

Ao analisar os eventos de galgamento obtidos segundo cada limite de segurança em cada uma das figuras acima apresentadas, em conjunto com os dados de Dir determinados para o mesmo período (1952 a 2010) na Figura 5.3, observa-se que, na maioria dos casos, os anos em que a direção média das ondas é mais próxima da direção perpendicular ($289,6^\circ$) apresentam um maior número de eventos de galgamento. Esta tendência pode ser facilmente observada pela comparação, por exemplo, dos anos 1962 e 1965: no primeiro destes anos, que apresenta direções de onda médias entre 234 e 339 [°], o número de eventos de galgamento não nulo é visivelmente superior ao segundo ano, onde os caudais se determinaram segundo uma variação maior de Dir, compreendidos entre 202 e 353 [°]. Esta diferença verifica-se em todos os intervalos de caudal exceto $q \in]0,4;200]$, que apresenta um número de eventos de galgamento semelhantes.

Quanto ao efeito da direção média de incidência da onda relativamente ao parâmetro de redução γ_β , apresenta-se na Figura 5.19 o gráfico que relaciona a percentagem de variação do caudal determinado sem γ_β , relativamente ao caudal com γ_β , e a direção de incidência média em cada caso de agitação.

Observa-se que os caudais obtidos são semelhantes entre si para uma direção de incidência próxima da perpendicular à estrutura, por volta dos 290° , aumentando a diferença entre os caudais com e sem γ_β com o aumento do afastamento de Dir em relação à direção perpendicular, ou seja, a influência de γ_β em q é maior quanto maior for a diferença entre $289,6^\circ$ e o Dir associado ao caso de agitação em análise, como seria de esperar, passando a ser da ordem dos 50% para direções de incidência da agitação a diferirem entre 270 e 285 [°].

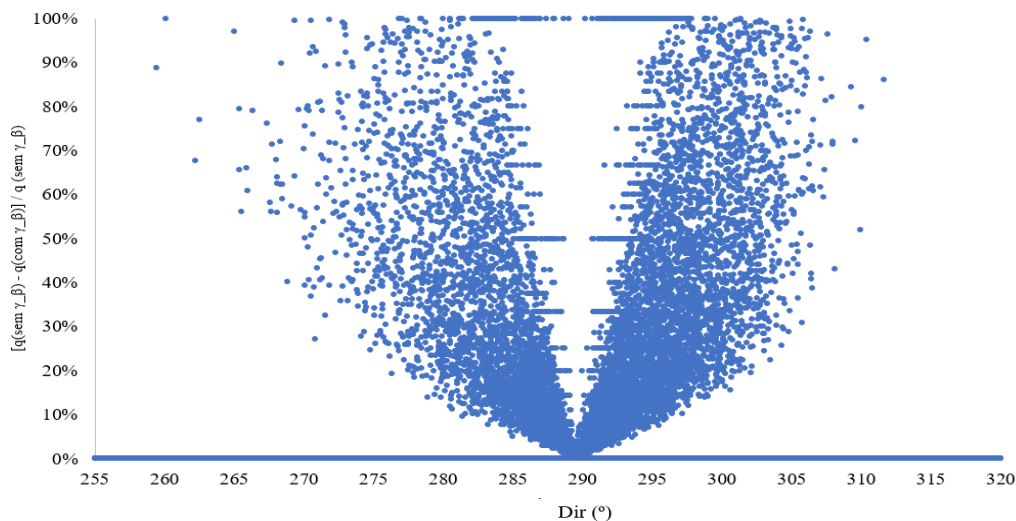


Figura 5.19 - Variação do caudal por Mase *et al.* sem γ_β , relativamente ao caudal com γ_β , segundo a direção de incidência média.

Por fim, analisou-se a percentagem de eventos com caudal galgado nulo, calculado com γ_β pela equação 2.8 e 2.9 e sem considerar γ_β . Observou-se que, no caso sem o fator de redução, ocorreu galgamento em 13543 das 86200 condições de agitação e nível do mar analisadas, isto é, em 16% do total. Quanto ao caso calculado com γ_β , registaram-se 12641 eventos com caudal não nulo, aproximadamente 15% do total. Apresentam-se, na Figura 5.20, as percentagens de caudais nulos e não nulos, referindo-se separadamente a percentagem de casos em que os caudais calculados considerando o fator de redução devido ao ângulo de incidência levou a resultados de caudal superiores e inferiores ao caso sem considerar a influência deste fator.

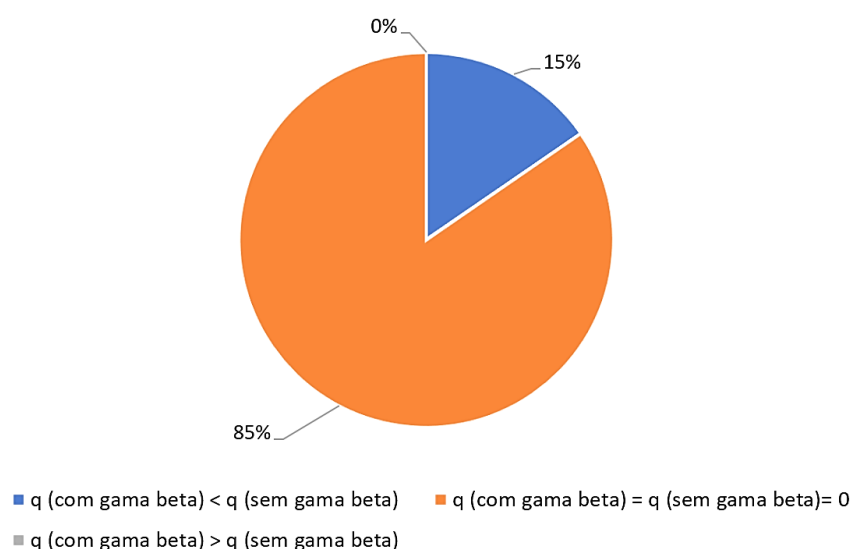


Figura 5.20 –Percentagem de eventos com caudais de galgamento, q , nulos e não nulos, calculados com e sem a influência de γ_β .

Como é possível observar na figura, aproximadamente 15% dos eventos registrados apresentam caudais de galgamento não nulos, sendo os 85% representativos dos caudais nulos comuns aos dois casos em análise. Em relação aos casos com galgamento não nulo, verifica-se que não houve nenhuma condição de agitação marítima em que o caudal obtido, considerando a influência de γ_β , fosse superior ao caudal não considerando esta influência, como seria de esperar.

5.2.4. Influência da modificação da fórmula de Mase *et al.* por Masatoshi *et al.* (2019)

Como já referido, em 2019 Masatoshi *et al.* apresentou uma revisão da fórmula inicialmente apresentada por Mase *et al.* que incide no cálculo dos caudais de menor valor. De modo a observar o efeito que esta alteração da fórmula tem no valor de caudal galgado, apresentam-se na Figura 5.21 os caudais de galgamentos determinados para um γ_f de 0.65 e considerando a influência de γ_β , para ambas as versões da fórmula.

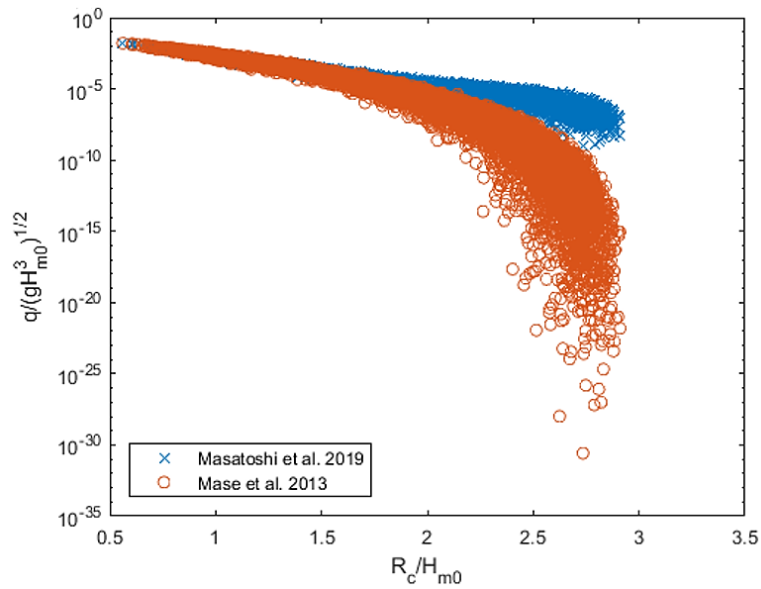


Figura 5.21 - Caudais de galgamento calculada por Mase *et al.* (2013) e por Masatoshi *et al.* (2019).

A análise da distribuição dos caudais galgados adimensionais permite verificar, de forma evidente, uma concordância nos valores de ambas as fórmulas para os maiores valores de caudais adimensionais, notando-se uma alteração nos valores de caudal de Masatoshi *et al.* a partir de um caudal adimensional de aproximadamente 1×10^{-4} . Enquanto que a fórmula de Mase *et al.* apresenta maior dispersão de valores para os caudais adimensionais de galgamento menores, atingindo valores adimensionais de 1×10^{-30} no seu extremo, a reformulação mais recente desta fórmula apresenta caudais adimensionais que “estabilizam” por volta dos 1×10^{-6} para os maiores valores de R_c/H_{m0} . Verifica-se assim que a correção, tal como refere Masatoshi *et al.*,

incide apenas nos menores valores de caudais, apresentando, nesses casos, resultados superiores aos de Mase *et al.*

Na Figura 5.22 faz-se uma comparação dos valores de caudal médio obtidos pelas equações de Mase *et al.* e Masatoshi *et al.*, na qual se observa a mesma tendência, isto é, que os valores apenas diferem para os caudais mais pequenos e que a fórmula proposta por Masatoshi *et al.*, leva a um aumento dos valores destes pequenos caudais.

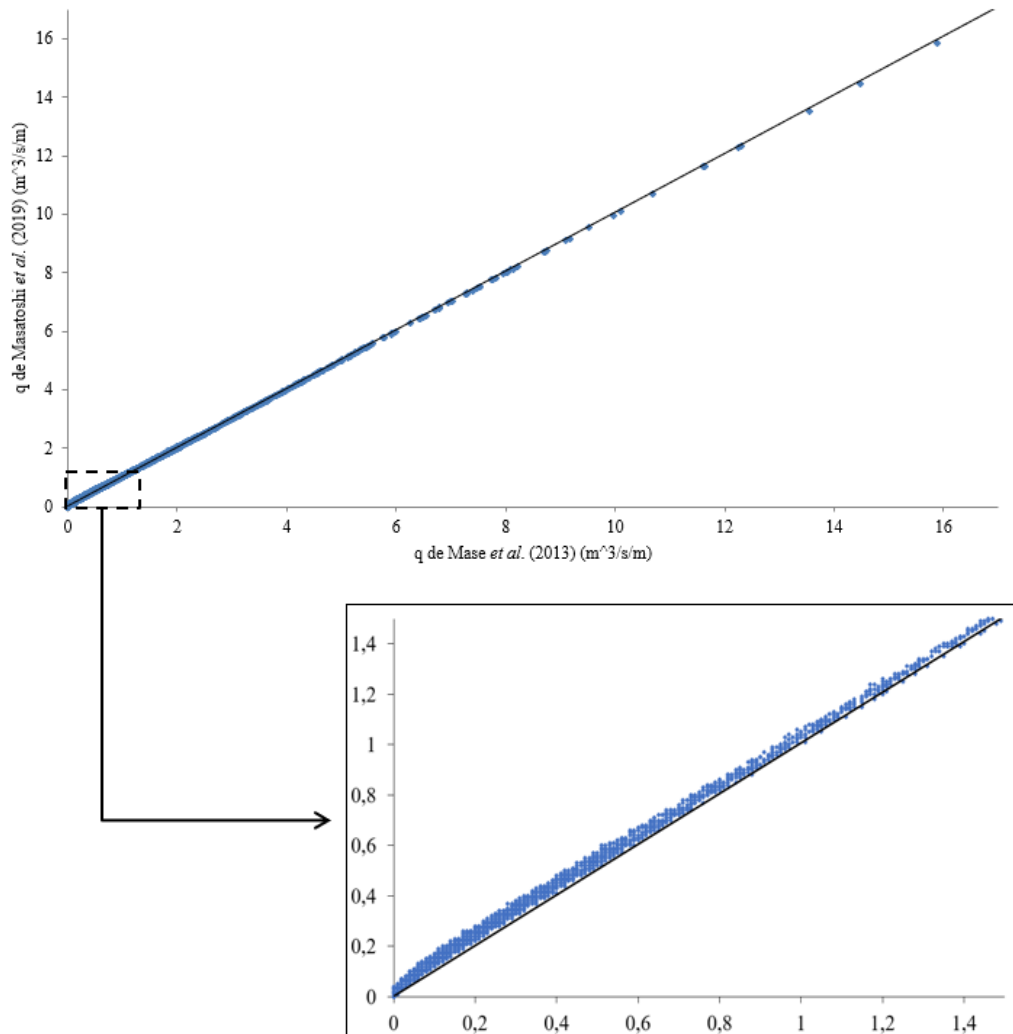


Figura 5.22 - Comparação de q obtido com as fórmulas de Mase *et al.* (2013) e de Masatoshi *et al.* (2019), para $\gamma_f = 0.65$.

Para determinar em que gama de valores de q variam os caudais determinados pelas duas fórmulas, na Figura 5.23 apresenta-se a diferença de valores de q obtidos pelas duas fórmulas, isto é, a diferença de caudais entre a fórmula de Mase *et al.* e a de Masatoshi *et al.*, em função do q calculado por Masatoshi *et al.*, no qual se pode observar que os caudais obtidos por Masatoshi

et al. tendem a ser cerca 0 a 2.5 vezes maiores que os caudais obtidos por Mase *et al.* para caudais inferiores a 1.2 m³/s/m, e diferem menos de 50% para caudais superiores a este valor, sendo praticamente nulas as diferenças para caudais superiores a 1.9 m³/s/m.

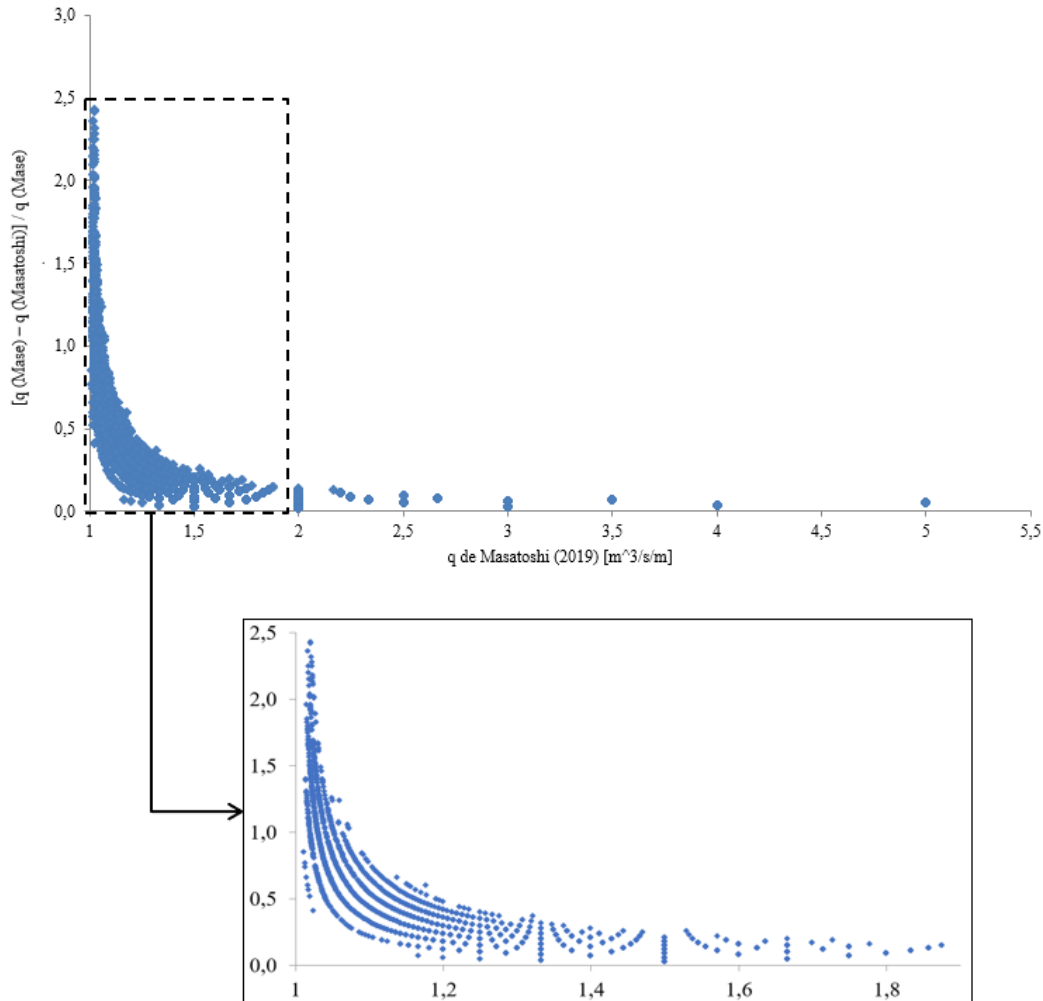


Figura 5.23 - Variação do caudal de galgamento, determinado segundo Masatoshi *et al.*, em relação ao caudal determinado segundo Mase *et al.*

5.3. Comparação de resultados com o manual EuroTop (2018)

Como já mencionado, a equação 2.11 do manual EuroTop é aplicável a casos de agitação marítima incidente com níveis de água em repouso acima do pé do talude da estrutura, obtendo-se uma boa aproximação do caudal galgado para estas condições. A fórmula de Mase *et al.*, por outro lado, está ajustada para o cálculo do espraçamento e do galgamento quando a agitação incidente na estrutura ocorre com níveis de mar que se encontram muito abaixo da cota do pé do seu talude.

No entanto, muitas vezes as fórmulas são aplicadas fora do seu campo de aplicabilidade, e dada a difusão do manual EuroTop, considerou-se interessante a realização de uma análise comparativa dos resultados obtidos com esta fórmula e com as de Mase *et al.* e de Masatoshi *et al.*, não só para avaliar a disparidade ou proximidade dos caudais de galgamento calculados para as mesmas condições de agitação, nível de mar e para a estrutura de proteção em análise, mas também se esses caudais, com a alteração dos fatores de redução, seguem padrões de variação semelhantes em ambas as fórmulas.

Assim, na Figura 5.24 comparam-se os caudais determinados com as fórmulas de Mase *et al.*, Masatoshi *et al.* e do EuroTop, para um mesmo fator de redução devido ao atrito, γ_f , de 0.80.

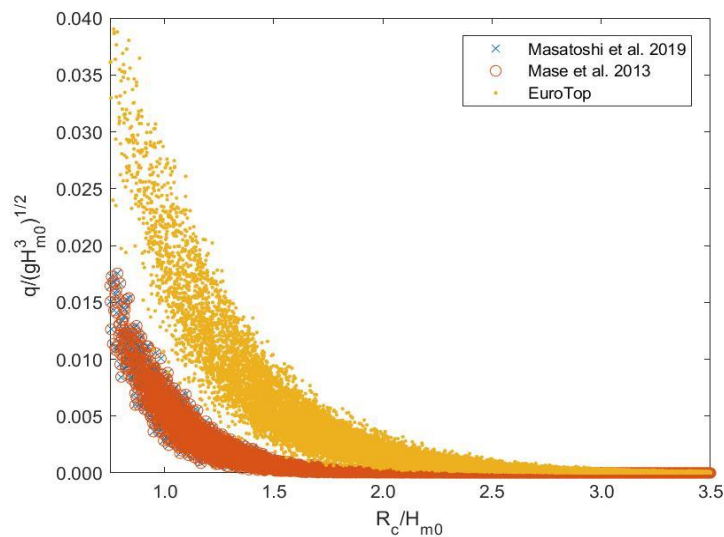


Figura 5.24 – Caudal médio galgado adimensional para γ_f de 0.80, obtidos com a fórmula de Mase *et al.*, Masatoshi *et al.* e EuroTop.

Como se pode constatar pela análise da figura acima, os caudais calculados segundo Mase *et al.* e Masatoshi *et al.* apresentam valores muito semelhantes entre si, e notoriamente inferiores aos de EuroTop (2018). A formulação do manual Eurotop atinge um caudal adimensional máximo de aproximadamente 0.046, cerca de 58% superior ao caudal máximo obtido pela fórmula de Mase *et al.* e ao de Masatoshi *et al.*, que apresentam um caudal adimensional máximo de 0.018. Um aspeto comum às três fórmulas é a diminuição dos caudais adimensionais de galgamento com o aumento da razão R_c/H_{m0} , que se verifica ser mais acentuada no caso do Eurotop.

As diferenças entre os resultados de cada fórmula são ainda mais evidentes ao analisar a distribuição logarítmica dos caudais galgados (Figura 5.25). Pode-se observar que, comparativamente aos valores de caudal obtidos por Mase *et al.* e Masatoshi *et al.*, que não

apresentam uma redução significativa dos valores de caudal para $R_c/H_{m0} > 2.5$, os caudais de galgamento determinados pelo EuroTop apresentam uma diminuição crescente com o aumento de R_c/H_{m0} .

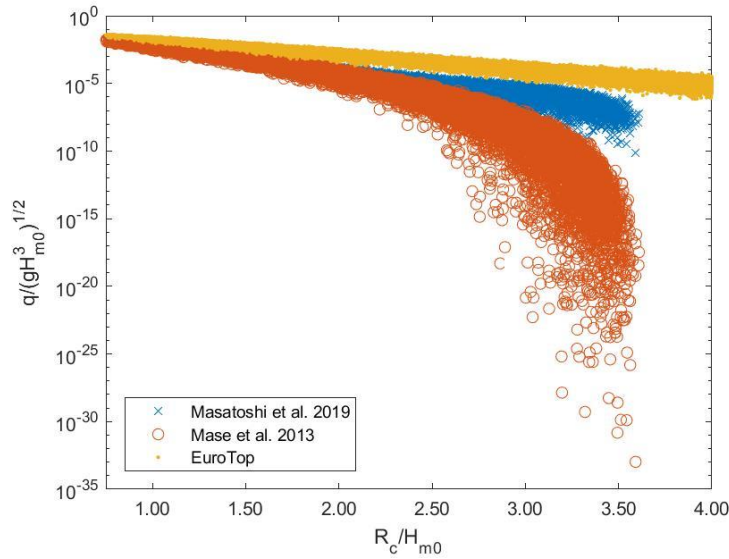


Figura 5.25 – Distribuição logarítmica de q para γ_f de 0.80, calculado pela a fórmula de Mase *et al.*, Masatoshi *et al.* e EuroTop.

Também na Figura 5.26 é possível observar, pela comparação da fórmula de Mase *et al.* e do EuroTop, que os caudais de galgamento do EuroTop são superiores aos de Mase *et al.*. Na Figura 5.27 apresentam-se as diferenças de valores de q das duas fórmulas, em função do q de Mase *et al.*, onde se verifica que a maioria dos valores de q obtidos pela fórmula do Eurotop são 90 a 100 [%] superiores aos obtidos por Mase *et al.*, reduzindo-se essa diferença para 70 a 80 [%] para os maiores valores de q da fórmula de Mase *et al.*.

De modo a comparar o efeito do coeficiente de redução devido ao atrito na fórmula de EuroTop com a de Mase *et al.*, foram seleccionados três valores de γ_f a analisar: 0.65, 0.80 e 0.90, calculando-se em seguida o número de eventos de galgamentos não nulos para ambas as fórmulas, (Figura 5.28). Complementarmente ao que já se observou (na comparação dos caudais realizada anteriormente) o número de eventos em que ocorre galgamento na estrutura é sempre maior caso o cálculo do caudal seja feito com a fórmula do EuroTop, aumento esse que se mostra mais acentuado para caudais entre 0.4 e 200 [l/s/m]. O valor máximo de caudal calculado com a fórmula do EuroTop foi de 8233 l/s/m, enquanto o maior caudal calculado com a fórmula de Mase *et al.* é de aproximadamente 60% do valor anterior, 4947 l/s/m (ambos valores obtidos com um γ_f igual a 0.90). Estes valores extremos correspondem a agitação caracterizada por um T_p elevado associado a um NM também elevado.

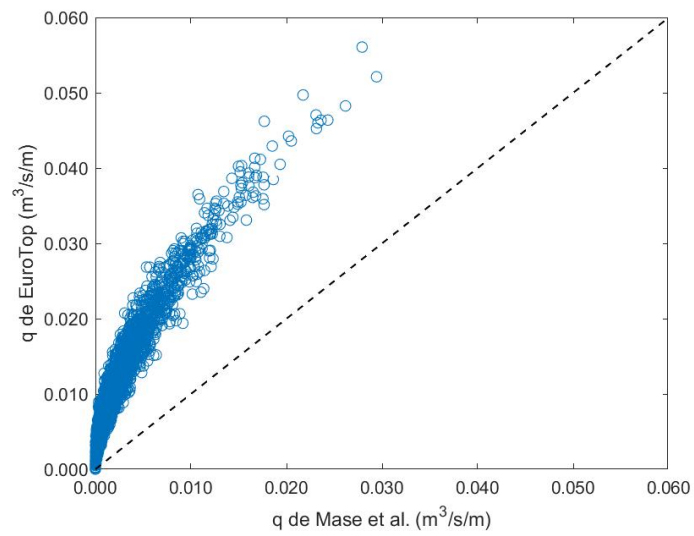


Figura 5.26 - Comparação de q segundo as fórmulas de Mase *et al.* (2013) e de EuroTop, para $\gamma_f = 0.80$.

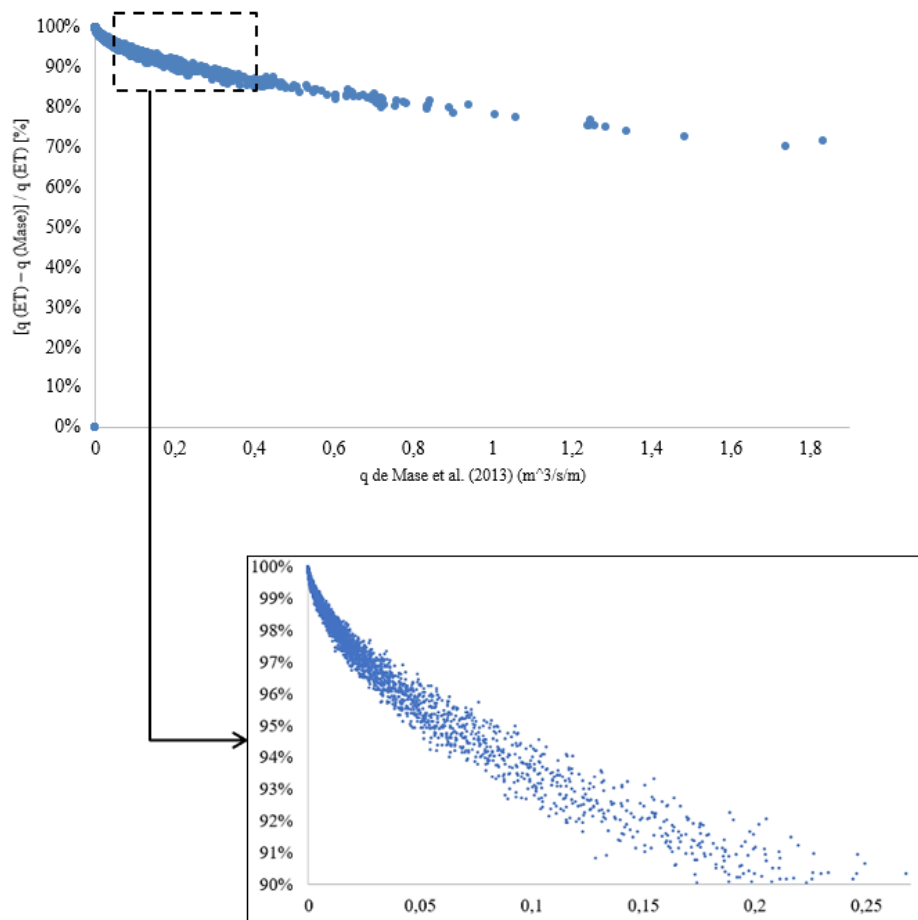


Figura 5.27 - Variação do q segundo Mase *et al.* relativamente a EuroTop, em ordem a Mase *et al.*

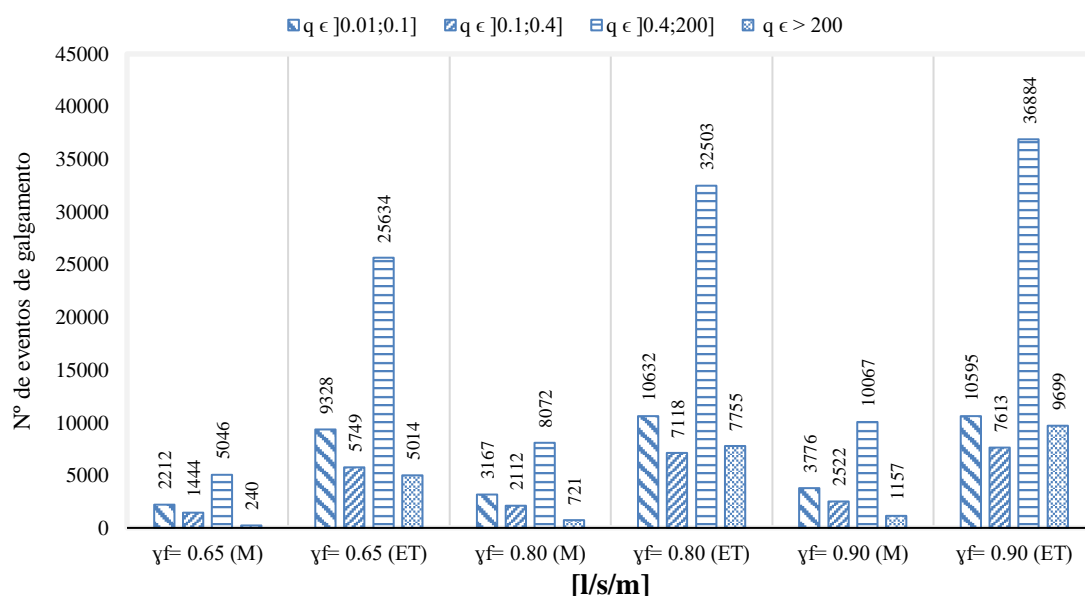


Figura 5.28 - Comparação do nº de eventos de galgamento, segundo Mase *et al.* (M) e o manual EuroTop (ET), para diferentes valores de γ_f , discretizados pelos limites de segurança admissíveis.

Apresenta-se, adicionalmente, no Quadro 5.7, o número máximo anual de eventos registado para cada gama de caudais, associadas a diferentes limites admissíveis de segurança, e o correspondente ano associado a cada um deles. Como referido, também relativamente ao número de eventos, observa-se que a fórmula de Mase *et al.* leva a um menor número de eventos em qualquer das gamas, independentemente do γ_f analisado.

Quadro 5.7 - Nº de eventos de galgamento máximos registados, com a fórmula de Mase *et al.* (M) e do EuroTop (ET), com o respetivo ano da sua ocorrência.

q (l/s/m)	Nº eventos (máximo/ano)					
	$\gamma_f = 0.65$ (M)	$\gamma_f = 0.65$ (ET)	$\gamma_f = 0.80$ (M)	$\gamma_f = 0.80$ (ET)	$\gamma_f = 0.90$ (M)	$\gamma_f = 0.90$ (ET)
[0.01;0.1]	63 (1962)	209 (1959)	83 (1961)	253 (1953)	95 (1963)	244 (1953)
[0.1;0.4]	45 (1968)	137 (2009)	69 (1996)	162 (1998)	74 (1961)	184 (1998)
[0.4;200]	158 (1995)	546 (1963)	226 (1995)	675 (2003)	259 (2007)	746 (2003)
> 200	18 (1977)	153 (1995)	33 (2007)	227 (1995)	50 (2007)	275 (2007)

No que se refere à percentagem de eventos com caudal nulo e não nulo para as fórmulas de Mase *et al.* e EuroTop, na Figura 5.29 apresentam-se os resultados obtidos com γ_f igual a 0.8.

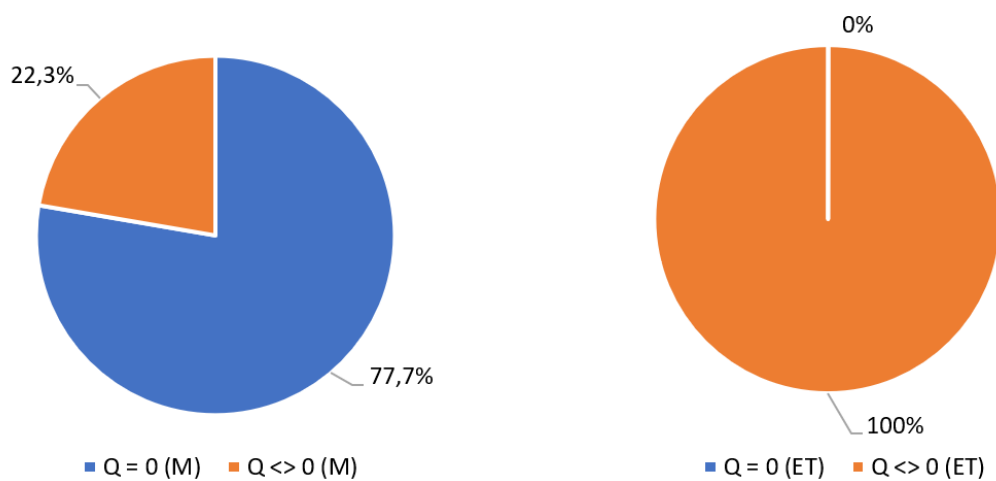


Figura 5.29 - Percentagem de eventos com q nulo e não nulo obtidos com as fórmulas de Mase *et al.* (M) e do EuroTop (ET), para um γ_f de 0.8.

Neste caso, observa-se que todos os 86200 casos considerados no cálculo do caudal pelo EuroTop apresentaram galgamento não nulo, enquanto que no caudal determinado segundo Mase *et al.* apenas 66971 dos 86200 eventos apresentaram caudal não nulo. Efetivamente, a fórmula de Mase *et al.* tem em consideração os eventos de galgamento nulo por calcular o espraçamento e só quando este é superior ao nível e coroamento é que calcula o galgamento, sendo os demais casos de caudal nulo por definição.

Capítulo 6 - Conclusões

6.1. Considerações gerais

A presente dissertação teve como objetivo o cálculo do galgamento ocorrente numa estrutura de proteção marginal localizada na costa oeste portuguesa, neste caso, a defesa aderente longitudinal situada na praia de Cova-Gala. Para tal consideraram-se as condições de agitação marítima e do nível do mar obtidas por *hindcast*, para o período compreendido entre 1952 e 2010, no ponto em frente à praia, a uma profundidade aproximada de -14 m (Z.H.), com coordenadas [10°W;40°N]. Para tal, utilizaram-se fórmulas de cálculo semi-empíricas, em particular a de Mase *et al.* (2013), e o modelo numérico IH-2VOF (2012).

A aplicação do modelo IH-2VOF ao caso de estudo foi realizada para três condições de agitação e nível de mar, a fim de verificar a capacidade deste modelo em calcular o galgamento na defesa longitudinal aderente em estudo, que se encontra em terra, o que implica que a simulação seja feita num domínio muito extenso na direção de propagação das ondas, pois deve incluir desde a zona onde se tem a condição de agitação, a -14 m (Z.H.), até ao coroamento da estrutura de defesa aderente.

As simulações iniciais realizadas com o modelo IH-2VOF, baseadas no caso de agitação com $H = 6.47$ m e $T = 17.08$ m, consideraram o domínio total em estudo e uma simulação de 1000 ondas, com condições simplificadas (estrutura impermeável e malha grosseira, com dimensão mínima de 0.25 m) e a duração total da simulação foi de cerca de 2.5 semanas. Reduziu-se depois a dimensão mínima da malha para 0.17 m e o elevado tempo de cálculo tornou a simulação inviável.

Para reduzir o tempo de cálculo e viabilizar a simulação, dividiu-se o domínio em dois, D1 e D2, e foram selecionadas três condições de agitação, otimizando-se as malhas. Duas malhas, 1 e 2, apresentam uma discretização mínima da malha, $\Delta_{\min} = 0.17$ m, e a malha 3 apresenta $\Delta_{\min} = 0.25$ m. Reduziu-se ainda o tempo total de simulação, de modo a gerar o número mínimo de ondas necessárias à validação do modelo (pelo menos 100 ondas). Os primeiros domínios das malhas 1, 2 e 3 concluíram as suas corridas em cerca de 2 a 3 dias, enquanto os respetivos domínios D2 apenas atingiram 6 a 10 [%] do tempo total de simulação pretendido, num período de 3 a 4 semanas. Durante o tempo de corrida destes segundos domínios não se obteve galgamento, impossibilitando assim a comparação dos caudais obtidos pelo modelo numérico com os que se calcularam através das fórmulas empíricas. Verificou-se que o tempo de cálculo,

mesmo dividindo o domínio em dois, era demasiado grande, o que torna esta ferramenta desadequada para apoio ao projeto deste tipo de obras.

Foi ainda realizada uma análise comparativa das condições de saída do domínio D1, superfície livre e velocidades horizontal e vertical, e de entrada do domínio D2, que deveriam ser semelhantes para a divisão dos domínios ser uma aproximação válida. A análise permitiu verificar que o acoplamento de domínios implementado no IH-2VOF não é correto e altera os dados quando a secção de acoplamento se encontra após a zona de rebentação das ondas, já que a geração com o batedor altera as velocidades na secção de acoplamento, especialmente a velocidade horizontal, alterando os resultados na secção de interesse do estudo, a secção onde se localiza a estrutura e onde se pretende obter o galgamento.

Os caudais de galgamento a analisar foram obtidos segundo a fórmula semi-empírica de Mase *et al.* (2013), tendo sido realizada uma análise de sensibilidade dos coeficientes de redução do galgamento: i) relativos à rugosidade das camadas da estrutura de proteção; ii) relativos à direção de propagação das ondas incidentes. Em primeiro lugar, obtiveram-se resultados do galgamento considerando um coeficiente de redução devido ao atrito de 0.65 e sem considerar qualquer outro coeficiente de redução. Dos resultados obtidos, 19% correspondem a caudais não nulos e a maioria dos eventos com caudal não nulo (29%) apresentam valores entre 0 e 0.01 [l/s/m].

Relativamente à análise da influência do coeficiente de redução, devido ao atrito no galgamento da estrutura em análise, foram analisados os caudais obtidos com γ_f a variar entre 0.65 e 0.90. Independentemente do valor de γ_f , em mais de 50% dos casos com caudal não nulo o caudal varia entre 0.4 e 200 [l/s/m]. Observou-se, como era espectável, que os caudais aumentam com o aumento γ_f e, como tal, os correspondentes ao coeficiente γ_f de 0.9 são os mais elevados, pois este valor corresponde a uma rugosidade que oferece menos resistência à passagem da massa de água (ou seja, a rugosidade da estrutura é menor). Isto faz também com que este γ_f apresente o maior número de eventos com caudal não nulo. Quanto ao ano com o número máximo de eventos registado com caudais entre 0.4 e 200 [l/s/m], verificou-se que foi o ano de 1995 para os valores mais baixos de γ_f , inferiores a 0.90, e 2007 para os restantes valores deste coeficiente.

Para a análise de influência do coeficiente de redução devido ao ângulo de ataque da onda, procedeu-se à comparação dos caudais de galgamento obtidos para um γ_β unitário e variável com o ângulo, concluindo-se que a inclusão de γ_β no cálculo do caudal está sempre associada a uma redução do caudal galgado e, conseqüentemente, do número de eventos para diferentes gamas de caudal, demonstrando-se assim a sua influência no cálculo do galgamento em casos de agitação com ângulos de incidência da onda não perpendiculares à estrutura. Dos 86200 casos de agitação

considerados, os caudais eram não nulos em apenas 15% dos casos quando calculados considerando o γ_β , sendo 16% não nulos sem considerar γ_β .

Analizou-se também o efeito da alteração da fórmula de Mase *et al.*, proposta em 2019 por Masatoshi *et al.*, nos valores do caudal galgado, para as mesmas condições de agitação e nível de mar. Da análise dos caudais obtidos por ambas as fórmulas, para $\gamma_f = 0.65$ e γ_β não nulo, concluiu-se que os resultados apenas diferem para pequenos valores de caudal, e que, nesses casos, a fórmula de Mase *et al.* apresenta valores mais reduzidos, tal como esperado.

Realizou-se ainda uma análise comparativa dos caudais obtidos entre a fórmula de Mase *et al.* e a do manual EuroTop, para três γ_f 's distintos, nomeadamente 0.65, 0.80 e 0.90. Pela análise dos caudais obtidos, os valores relativos à fórmula de Mase *et al.* são mais reduzidos que os do EuroTop, em qualquer caso de agitação analisado. Ao analisar os eventos de galgamento ocorridos para ambas as fórmulas, observa-se a mesma tendência, com um número de eventos de caudal não nulo significativamente mais elevado para o EuroTop. Em ambos os casos, o maior número de eventos ocorre para caudais entre 0.4 e 200 [l/s/m]. Verificou-se ainda que o caudal máximo obtido com a fórmula do EuroTop é 60% superior ao máximo obtido com a de Mase *et al.*

6.2. Desenvolvimentos Futuros

São apresentadas, em seguida, algumas propostas com interesse para a continuação do trabalho realizado nesta dissertação.

No que se refere à aplicação do modelo numérico IH-2VOF ao estudo de galgamento de defesas aderentes longitudinais localizadas em terra e com fundos de declive suaves, a sua utilização para domínios de grandes dimensões é ainda pouco viável. Assim, sugere-se trabalhar, em colaboração com a Universidade de Cantabria, que desenvolveu o modelo, no sentido de mitigar o tempo de processamento associado à simulação de domínios extensos com, por exemplo melhorias no acoplamento entre domínios.

Seria também interessante a realização de ensaios em modelo físico reduzido de forma a obter os caudais de galgamento para estes casos e, com isto, efetuar uma calibração do coeficiente de redução devido à rugosidade das diferentes camadas constituintes da defesa aderente longitudinal utilizado nas fórmulas de cálculo do galgamento, já que o valor deste coeficiente tem grande impacto no galgamento calculado pelas fórmulas.

Bibliografia

- Allsop, N. W. H., Bruce, T., Pullen, T., & van der Meer, J.** (2008). Direct Hazards From Wave Overtopping – the Forgotten Aspect of Coastal Flood Risk Assessment. *43rd DEFRA Flood and Coastal Management Conference*, Manchester.
- Bairrão, M. R. M.** (2014). *Galgamento de estruturas portuárias protegidas por um quebra-mar submerso*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, FCT-UNL, Lisboa.
- Baker, S., Canada, C., Cornett, A., & Canada, C.** (2018). Evaluation of a Numerical Wave Modelling Tool for Studying the Overtopping of Rubblemound Breakwaters. *Coastlab 18*. Universidad de Cantabria, Santander.
- Coastal Engineering Research Center.** (1984). *SHORE PROTECTION MANUAL*. USA: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers.
- García, R. G.** (2007). *Análisis de la funcionalidad y estabilidad de obras marítimas mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones de Reynolds*. Tese de Doutoramento em "Caminos, Canales y Puertos", Universidad de Cantabria, Cantabria.
- IH2VOF** (2012) - *IH2VOF Course* (november 20th, 2012 – november 21st, 2012). 121 p., IH Cantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, España. *Unpublished*.
- Kamphuis, J. W.** (1999). *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Retrieved from <https://doi.org/10.1142/7021>
- Lara, J. L., Ruju, A., & Losada, I. J.** (2011). Reynolds averaged Navier–Stokes modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 467 (2129), 1215–1242. Doi: 10.1098/rspa.2010.0331
- Masatoshi, Y., Naoya, O., Mase, H., Kim, S., Umeda, S., & Tamore, C.** (2019). Applicability enhancement of integrated formula of wave overtopping and runup modelling. *Journal of JSCE, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 75.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S., & Reis, M. T.** (2013). Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 139 (5), 346–357. Doi: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000199
- Oliveira, F., & Brito, F.** (2015). Evolução da morfologia costeira a sul da embocadura do Rio Mondego, de 1975 a 2011. *VIII Congresso Sobre Planeamento e Gestão Das Zonas Costeiras Dos Países de Expressão Portuguesa*. Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Pernal, J.** (2017). *Avaliação do Espraçamento e Inundação nas praias da Costa da Caparica. Modelação com o modelo XBEACH*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, ISEL, Lisboa.
- Santos, F. D., Lopes, A. M., Moniz, G., Ramos, L., & Taborda, R.** (2014). *Gestão da Zona Costeira o Desafio da Mudança*. Retrieved from http://apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2015/GTL_Relatorio%20Final_20150416.pdf
- Sousa, N. M. B. de.** (2011). *Obras marítimas de acostagem: o caso do porto de abrigo da Ilha do Porto Santo*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Madeira, Madeira.
- Steendam, G. J., Van Der Meer, J. W., Verhaeghe, H., Besley, P., Franco, L., & Van Gent, M. R. A.** (2004). The international database on wave overtopping. *29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisbon. Doi: 10.1142/9789812701916_0347

T. Pullen, Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & Meer, J. W. van der. (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Retrieved from www.overtopping-manual.com

USACE. (2011). *Coastal Engineering Manual: Part VI Chapter 5 Fundamentals of Design*. Retrieved from: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1100_Part-06.pdf?ver=2014-03-10-135408-527

Van der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., ... Zanutigh, B. (2018). *EuroTop Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures. An Overtopping Manual Largely Based on European Research, but for Worldwide Application*. Retrieved from www.overtopping-manual.com

W1 - Inundações: os locais mais críticos (2014). Consult. 23 Mar. 2019, Disponível em <https://tvi24.iol.pt/sociedade/praias/inundacoes-os-locais-mais-criticos>.

W2 - Praia do Castelo (2014). Consult. 17 Abr. 2019, Disponível em <http://praiaportugal.com/praiado-castelo/>.

W3 - Statistical description of wave parameters. Consult. 17 Abr. 2019, Disponível em http://www.coastalwiki.org/wiki/Statistical_description_of_wave_parameters.

W4 - Canais de ondas irregulares. Consult. 4 Ago. 2019, Disponível em <http://www.lnec.pt/pt/investigacao/infraestruturas-de-investigacao/instalacao-experimental-de-hidraulica-maritima/canais-de-ondas-irregulares/>.

W5 - Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. Consult. 12 Mai. 2019, Disponível em <http://www.overtopping-manual.com/>.

W6 – IH2VOF. Consult. 5 Jun. 2019, Disponível em <http://ih2vof.ihcantabria.com/>

W7 - Estatística do concelho. Consult. 10 Ago. 2019, Disponível em <http://www.cm-figfoz.pt/index.php/estatistica-do-concelho>.

W8 - Linha de costa em situação de erosão. Consult. 10 Ago. 2019, Disponível em <https://rea.apambiente.pt/content/linha-de-costa-em-situa%C3%A7%C3%A3o-de-eros%C3%A3o>.

W9 – PORDATA – Base de Dados dos Municípios. Consult. 11 Ago. 2019, Disponível em <https://www.pordata.pt/Municipios>.

W10 - Mapa das freguesias. Consult. 11 Ago. 2019, Disponível em <https://www.cm-figfoz.pt/index.php/novo-mapa-das-freguesias>.